

IB 131-2015 / 21

**Untersuchung des Einflusses lagenvariabler
Schäftungswinkel auf die Verbindungsfestigkeit
geklebter Faserverbundreparaturen**

Holzhüter, Dirk
Dietsch, Florian



**Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik
Braunschweig**

09 / 2015

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtzgemeinschaft
Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

IB 131-2015/21

**Untersuchung des Einflusses lagenvariabler
Schäftungswinkel auf die Verbindungsfestigkeit geklebter
Faserverbundreparaturen**

Braunschweig, 09/15

Der Bericht umfasst:

117 Seiten

Institutsleiter:
Prof. Dr.-Ing. M. Wiedemann



Verfasser:
Dipl.-Ing. D. Holzhüter



Leiter der Abteilung:
Prof. Dr.-Ing. C. Hühne



Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Inhaltsverzeichnis	iv
Symbolverzeichnis	v
Abkürzungsverzeichnis	vii
1 Einleitung	1
2 Reparatur von FKV-Strukturen	3
2.1 Schadensursachen	3
2.2 Reparaturverfahren	4
2.2.1 Reparatur durch Bolzenverbindung	5
2.2.2 Reparatur durch Klebung	5
3 Geschäftete Klebverbindungen	11
3.1 Eigenschaften von Schäftungen	11
3.2 Schäften als Reparaturverfahren	12
3.3 Mechanische Analyse von Schäftungsverbindungen	14
3.4 Variation des Schäftungswinkels	17
4 Methoden und Werkstoffe	19
4.1 Prüfkörper und Nomenklatur	19
4.2 Werkstoffkennwerte	21
4.2.1 Laminat	21
4.2.2 Klebstoff	23
4.2.3 Referenzversuche mit einer 1:20-Schäftung	25
4.3 Variable Schäftungen	25
4.3.1 Abschätzung des idealen Schäftungswinkels	25
4.3.2 Geometrie der variablen Schäftung	26
5 Numerische Untersuchung	31
5.1 Dreidimensionales FE-Modell	31
5.1.1 Modell	31
5.1.2 Pre- und Postprocessing	32
5.1.3 Auswertung der FE-Simulation	35
5.1.4 Einfluss der Vernetzung	41
5.2 Durchführung und Ergebnisse	44
5.2.1 Simulationen mit Laminataufbau QI1	45
5.2.2 Simulationen mit Laminataufbau QI3	51
5.2.3 Manuell angepasster Schäftungswinkel	54
5.2.4 Verkürzte Reparaturlänge	55
5.2.5 Simulation von ETD-Prüfbedingungen	56

5.3 Vergleich und Zusammenfassung	57
6 Experimentelle Untersuchung	59
6.1 Voruntersuchungen	59
6.1.1 Klebschichtqualität	59
6.1.2 Erwärmung der Proben	62
6.2 Probenprogramm	63
6.3 Fertigung der Proben	63
6.4 Verifizierung der Probenqualität	68
6.5 Versuchsaufbau	76
6.5.1 Prüfeinrichtung	76
6.5.2 Optisches Messsystem <i>ARAMIS</i>	76
6.5.3 Durchführung	76
6.6 Ergebnisse der experimentellen Untersuchung	78
6.6.1 Prüfergebnisse Laminataufbau QI1	78
6.6.2 Prüfergebnisse Laminataufbau QI3	84
6.6.3 Prüfergebnisse bei ETD-Bedingungen	88
6.6.4 Vergleich der Zugprüfungsergebnisse und Schlussfolgerung	88
7 Auswertung und Vergleich	91
8 Zusammenfassung und Ausblick	93
8.1 Zusammenfassung	93
8.2 Ausblick	94
Literaturverzeichnis	98
Anhang A: Herleitung der reduzierten Lagensteifigkeiten	99
Anhang B: Protokolle	101
Anhang C: Datenblätter	105

Symbolverzeichnis

Lateinische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
A	mm	Fläche
b	mm	Probekörperbreite
E	GPa	Elastizitätsmodul
d	mm	Abstand
F	kN	Zugkraft
G	GPa	Schubmodul
l	mm	Probekörperlänge
L	mm	Reparaturlänge
Q	MPa	reduzierte Steifigkeit
s	-	Standardabweichung
t	mm	Dicke
ν	mm	Variationskoeffizient
x	-	x-Richtung
y	-	y-Richtung
z	-	z-Richtung

Griechische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
γ	°	Scherwinkel
ε	-	Dehnung
ν	-	Querkontraktionszahl
σ	MPa	Normalspannung
τ	MPa	Schubspannung
θ	°	Schäftungswinkel

Indizes

Zeichen	Bezeichnung
AVG	durchschnittlich
f	freie Weglänge
K	Klebschicht
L	Lage
m	Matrix
max	maximal
min	minimal
M	Versagen
N	Normalenrichtung
s	symmetrisch
S	Schäftung
ult	Bruch
v	Vergleichsspannungshypothese nach VON-MISES
x	x-Richtung
y	y-Richtung
z	z-Richtung

Abkürzungsverzeichnis

Zeichen	Bezeichnung
100	Prüftemperatur 100° C
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
CAD	Computer-Aided Design
CAIRE	Composite Adaptable Inspection and REpair (Strukturelle Klebereparaturen an Luftfahrzeugen)
CFK	kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
DLR	Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt
DMS	Dehnungsmessstreifen
ETD	Elevated Temperature Dry
ETW	Elevated Temperature Wet
FAA	Federal Aviation Administration (US-Luftfahrtbehörde)
FOD	Foreign Object Damage
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
FE	Finite Elemente
FEM	Finite Elemente Methode
K	konstant
KLuB	Fachgebiet Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen (TU Darmstadt)
NDT	Non-destructive Testing (Zerstörungsfreies Prüfverfahren)
QI	quasi-isotrop
RT	Room Temperature
RTD	Room Temperature Dry
SRM	Structural Repair Manual
TEN	Zugversuch
UD	unidirektional
USAF	US Air Force
V	variabel



1 Einleitung

Seit Mitte des 20. Jahrhunderts findet die industrielle Anwendung von Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV) in besonderem Maße in der von Leichtbauoptimierung geprägten Luftfahrtindustrie statt. Vor allem eine hohen spezifischen Festigkeit und einer damit einhergehenden hohen Leichtbaugüte verhelfen diesen Werkstoffen zu einem Vorteil gegenüber den klassischen Metallen. Diese Entwicklung begann in den 1960er Jahren mit der Verwendung von Kohle- und Bohrfasern, eingebettet in eine Epoxidharzmatrix. Zu Beginn ergaben sich vor allem Anwendungsgebiete im Bereich der Sekundärstrukturen, wie beispielsweise Verkleidungsbauteile [Har06]. Im Jahr 1987 begann der Flugzeughersteller *Airbus Industries* zusammen mit der Einführung des Airbus A310 erste Primärstrukturen in Form des Seitenleitwerks aus FKV herzustellen. Diese Entwicklung setzte sich in den letzten Jahren fort und führte zu einer Erweiterung des Einsatzes im Bereich der Primärstrukturen. Aktuelle Flugzeugentwürfe wie die Boeing 787 oder der Airbus A350 bestehen bis zu 52 % (bezogen auf das Gewicht) aus FKV-Werkstoffen, wobei meist kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) verwendet werden [Sau07].

Mit steigendem Einsatz dieser Flugzeugtypen in der kommerziellen Luftfahrt steigt das Risiko von Beschädigungen der FKV-Strukturen. Ursachen sind beispielsweise die Kollision mit Vögeln, Blitzeinschläge oder Unfälle mit Fahrzeugen während der Bodenzeiten. Da es sich meist um große, integrale Bauteile handelt, ist eine Reparatur die einzige wirtschaftliche Option [Har06]. Derzeitige Verfahren basieren weitgehend auf den herkömmlichen, bisher bei Aluminiumlegierungen verwendeten Reparaturen, wie das Aufnieten eines externen Pflasters (doubler). Solche Bolzenverbindungen sind gründlich untersucht und garantieren eine ausreichende Festigkeit der Reparaturstelle. Der Einsatz von FKV-Strukturen bietet jedoch neue Reparaturmöglichkeiten, insbesondere im Bereich der Strukturklebungen. Diese weisen gegenüber herkömmlichen Verfahren Vorteile bezüglich Leichtbaugüte und Integrität der Reparaturstelle auf. Eine besondere Form ist die Schäftung, bei der die Fügepartner an einer schrägen Zuschäftung miteinander verklebt werden. Im Vergleich zur klassischen Überlappungsklebung besitzt diese den Vorteil einer mittig angreifenden Zugkraft, wodurch nur geringe Schälbeanspruchungen auftreten.

Um ausreichende Festigkeiten der Reparaturstelle zu garantieren, sind genaue Kenntnisse des Werkstoffverhaltens und der mechanischen Eigenschaften der Strukturklebungen von Interesse. Insbesondere bei Bauteilen der Primärstruktur sind Verfahren notwendig, die sicher stellen, dass mindestens die Festigkeit der Ausgangsstruktur wiederhergestellt wird. Trotz weitreichender Forschungsarbeit auf dem Gebiet der Klebverbindungen zeichnen sich diese im Gegensatz zu herkömmlichen Reparaturverfahren durch geringe Zuverlässigkeit aus. Dies ist einerseits der Notwendigkeit eines hohen Anteils an manuellen Arbeiten, andererseits der unzureichenden Möglichkeiten der Überprüfung gefertigter Klebungen auf Fertigungsfehler geschuldet. Aus diesem Grund sind geklebte Reparaturen von FKV-Strukturen an Primärstrukturbauteilen nur zugelassen, wenn die Beschädigung die Betriebsfestigkeit nicht beeinflusst. Bei der US Air Force (USAF) dürfen solche Klebungen beispielsweise nur durchgeführt werden, wenn die betroffene Ausgangsstruktur auch ohne Reparatur fähig ist, die Höchstlast zu garantieren [DB99]. Solche Vorgaben führen dazu, dass Bauteile verschrottet werden müssen, obwohl eine gut ausgeführte Klebung ausreichende Festigkeit garantiert hätte. Daher sind weitere detaillierte wissenschaftliche Erkenntnisse über das Versagensverhalten von Klebverbindungen notwendig, um zukünftig die Möglichkeit eines Zulassungsverfahrens zu eröffnen.

Ein besonderes Problem von Klebverbindungen ist die Prozesssicherheit und die damit einhergehende Reproduzierbarkeit der Klebstofffestigkeit. Dies kann nur durch Prozesse garantiert werden, die sich exakt wiederholen lassen, was beispielsweise durch einen hohen Automatisierungsgrad sichergestellt wird. Gegenstand aktueller Forschung und Entwicklung ist daher der Einsatz von Fräsmaschinen zur Herstellung von Schäftungsreparaturen. Vor allem mobile Anlagen würden die Anwendung direkt am Flugzeug ermöglichen und kostenintensive Überführungsflüge oder einen Ausbau von Bauteilen vermeiden. Außerdem bietet solch ein Einsatz die Möglichkeit, dreidimensionale Schäftungen an mehrfach gekrümmten Bauteilen zu erzeugen. Bisher war es aufgrund der oftmals kleinen geometrischen Abmessungen nicht möglich, händisch eine Variation des Schäftungswinkels sowohl in Umfangsrichtung der Reparatur, als auch über der Dicke des Laminats zu erreichen. Gerade Letzteres hätte positiven Einfluss auf die Festigkeit der Reparatur, da es möglich wäre, die durch die unterschiedliche Winkelausrichtung der Lagen verursachten Spannungsspitzen in der Klebschicht zu reduzieren. Schäftungen könnten somit direkt durch Winkelanpassung für den im Bauteil zu erwarteten Belastungszustand optimiert werden. Neben dem Vorteil einer möglichen Festigkeitssteigerung, hätte dies eine Verringerung der Reparaturfläche und Reduzierung intakter Ausgangsstruktur zur Folge.

Gegenstand der vorliegenden Masterarbeit ist die Untersuchung und Analyse des Potentials lagenvariabler Schäftungen an einer zweidimensionalen Reparaturstelle in CFK-Strukturen. Dabei werden mittels eines dreidimensionalen FE-Couponmodells verschiedene Schäftungsgeometrien in zwei Laminaten ermittelt und anschließend experimentell mittels Zugprüfung validiert.

2 Reparatur von FKV-Strukturen

Mit zunehmender Verwendung von FKV-Werkstoffen in Flugzeugprimärstrukturen steigt die Wahrscheinlichkeit einer Beschädigung während des Betriebs. In diesem Kapitel werden mögliche Schadensarten an FKV-Strukturen, deren Ursachen und gängige Reparaturverfahren vorgestellt.

2.1 Schadensursachen

Die Beschädigung einer Flugzeugstruktur ist allgemein definiert als eine bleibende Deformation oder Reduzierung des Querschnitts eines Strukturbauteils [ABC05]. Dies gilt auch für FKV-Bauteile, wobei Schäden ihre Ursache in der Produktion, des Betriebs oder durch falsche Handhabung haben können [Niu92]. Produktionsbedingte Fehler äußern sich als oberflächliche Eindrückungen oder Fehlstellen innerhalb des Laminats. Diesem Schadenstyp wird durch eine verstärkte Qualitätskontrolle entgegen gewirkt. Während des Betriebes ist die Struktur vor allem Beschädigungen durch Hagel, Vogelschlag, Blitzschlag oder generell Fremdkörpern (foreign object damage, FOD) ausgesetzt. *Lufthansa Technik* gibt an, dass im Jahr 2006 ca. 75 % der Beschädigungen an Teilen aus Verbundwerkstoffen durch einen mechanischen Einschlag verursacht wurden [Sau07]. Die häufigste Ursache liegt in einer falschen Handhabung während Beladungsvorgängen am Boden oder Wartungsereignissen („tool drop“). Auch Feuchtigkeits- und Temperaturunterschiede, welchen die Strukturbauteile während des normalen Betriebs ausgesetzt sind, rufen langfristig Beschädigungen hervor. Die folgenden Schadensbilder werden unterschieden [BDK04]:

- Loch
- Riss oder Kratzer
- Falte
- Verdrehung
- Kerbe
- Korrosion (meist galvanisch zwischen Metall- und Kohlefaserteilen)
- Delamination
- Überhitzung

Einige dieser Schadensbilder und deren Ursachen sind in Abbildung 2.1 dargestellt. Weiterhin kann eine Einteilung in vernachlässigbare, reparierbare oder irreparable Schäden vorgenommen werden. Beschädigungen, die nicht die Festigkeit, Stabilität oder Funktion eines Bauteiles beeinflussen, sind mit einfachen Mitteln (wie beispielsweise das Ausschleifen einer Delle) zu beheben oder vernachlässigbar. Reparierbare Schäden können entweder durch das Aufbringen eines Pflasters oder durch Einfügen eines Einsatzstückes behoben werden. Angaben zu genauen Reparaturverfahren werden im Structural Repair Manual (SRM) eines jeden Flugzeugmodells angegeben. Hoch belastete oder für eine Reparatur geometrisch zu komplizierte Bauteile erfordern meist einen Austausch. Neben der technischen Machbarkeit muss stets die Wirtschaftlichkeit bei der Entscheidung der erforderlichen Maßnahmen in Betracht gezogen werden [BDK04].

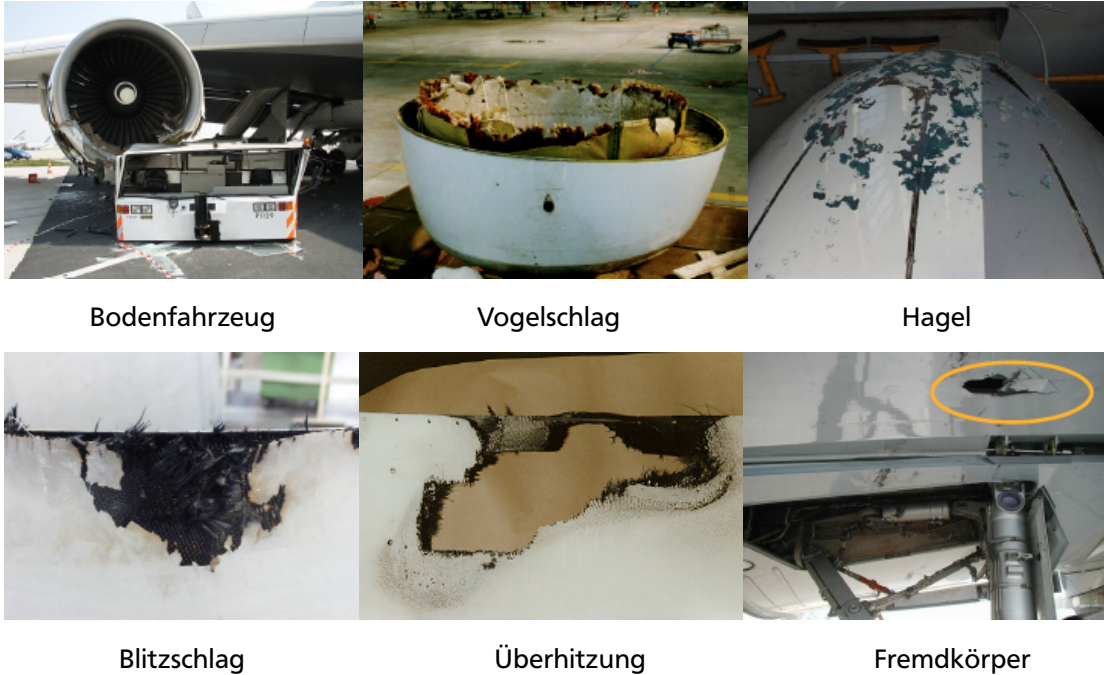


Abbildung 2.1: Beispiele für typische Schadensbilder an FKV-Strukturen [Sau07]

2.2 Reparaturverfahren

Der steigende Einsatz von FKV-Strukturen erfordert Reparaturverfahren, welche die Integrität der Struktur, d.h. die Festigkeit und Stabilität, wiederherstellen [Niu92]. Durch die besonderen Anforderungen bei der Herstellung von FKV-Bauteilen, wie der Anwendung von Druck-, Temperatur- und Vakuumverfahren, sind den Reparaturmöglichkeiten Grenzen gesetzt. Daher müssen Reparaturen schon während der Entwicklungs- und Auslegungsphase berücksichtigt werden. Im Folgenden werden die wichtigsten Anforderungen vorgestellt:

1. Die wichtigste Anforderung an eine Reparatur ist die Wiederherstellung der Stabilität, Steifigkeit und Festigkeit eines Bauteils. Je nach Bauteil und Umgebung ist dies nicht immer vollständig möglich.
2. Langzeitbelastungen wie Schwingungen und Umwelteinflüsse (Temperatur, Feuchtigkeit) dürfen keinen Einfluss auf die Festigkeit haben.
3. Besonders in der kommerziellen Luftfahrt spielen kurze Reparaturzeiten und niedrige Kosten eine Rolle. Darauf wirken sich benötigte Werkzeuge, Hallen, Personalaufwand und Materialkosten aus.
4. Je nach Position eines Bauteils entstehen weitere Anforderungen, beispielsweise bezüglich aerodynamischer Güte (Flügel, Außenhaut) oder chemischer Beständigkeit (Tank).

Unterschieden werden Reparaturverfahren mit Aufbringung eines Pflasters (Patch Repair) und Verfahren die kein Reparaturpflaster (Non-patch Repair) erfordern [BDK04]. Zwei wesentliche Reparaturverfahren zur Aufbringung eines Pflasters sind üblich: die Verbindung durch Bolzen oder Klebstoff. Welches Verfahren verwendet wird, hängt vor allem von der Dicke der Bauteile, der notwendigen Kosten, der vorhandenen Reparaturfläche, der Reparaturzeit, der erforderlichen Festigkeit und reparaturrelevanten Umwelteinflüssen ab. Auf Reparaturen ohne Verwendung von Pflastern, beispielsweise Injektionsverfahren, soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden, da diese nur bei kleineren Beschädigungen Anwendung finden.

2.2.1 Reparatur durch Bolzenverbindung

Reparaturen mit Bolzenverbindungen (d.h. Schrauben oder Niete) wurden größtenteils von herkömmlichen Verfahren für metallische Strukturbauteile übernommen [Niu92]. Pflaster aus Titan, Aluminium, Stahl oder vorgefertigten FKV-Platten können, unabhängig vom Grundwerkstoff, schnell und mit geringem Aufwand über der Schadensstelle angebracht werden. Dazu sind wenige oder keine Vorbereitungen notwendig und die Arbeiten bedürfen keiner speziellen Umgebung (z.B. Hangar). Auch ein nachträgliches Lösen dieser Verbindungen ist möglich [Sch07]. Durch den langjährigen Einsatz bei Strukturreparaturen liegen grundlegende Erfahrungen bezüglich der zu erwartenden Festigkeiten und Versagensmechanismen vor. Da beispielsweise bei Nietverbindungen unmittelbar durch Sichtprüfung der korrekte Sitz eines Niets nachgewiesen werden kann, ist eine gute Qualitätssicherung gewährleistet. Nachteil ist, neben der Gewichtszunahme durch Materialdopplung und Bolzen, die zusätzliche Verringerung der Festigkeit durch die zwangsweise benötigten Bohrungen und einer damit einhergehenden Reduzierung des Querschnitts der Ausgangsstruktur. Besonders an den Rändern der Bohrlöcher entstehen aufgrund der Kerbwirkung Spannungsüberhöhungen und Ausgangspunkte für Ermüdungsrisse. Das Einbringen der Bohrungen selbst birgt das Risiko weiterer Beschädigungen. Pflaster oder überstehende Bolzen auf der Außenhaut eines Flugzeugs verursachen außerdem zusätzlichen aerodynamischen Widerstand.

2.2.2 Reparatur durch Klebung

Strukturklebungen sind bei der Produktion von Luftfahrzeugen seit den vierziger Jahren im Einsatz [Hab09] und durch die steigende Verwendung von FKV-Strukturen immer häufiger im Reparaturbereich zu finden. Kleben zählt, wie Schweißen oder Löten, zu den stoffschlüssigen Fügeverfahren, welche sich durch Zugabe eines Stoffes zur Verbindungsbildung auszeichnen [Hab08].

Eigenschaften der Klebverbindungen

Klebungen eignen sich im Allgemeinen besonders zum Fügen dünnwandiger, flächiger Bauteile und stellen daher eine Verbindung mit hoher Leichtbaugüte dar [Sch07]. Die Klebfläche muss groß genug sein, um die Kräfte sicher zu übertragen, da der Klebstoff eine geringere Festigkeit als die zu fügenden Teile aufweist. Die Übertragung der Kräfte erfolgt daher, bei einem niedrigen Spannungsniveau, über große Fügeflächen. Strukturklebungen bieten folgende Vorteile:

- Im Gegensatz zur Bolzenverbindung entsteht bei der Klebung keine Kerbwirkung und keine Verringerung der tragenden Querschnitte.
- Durch fehlende Fügeelemente verringert sich das Strukturgewicht.
- Senkrecht zur Belastungsrichtung herrscht über die Breite der Klebung eine gleichmäßige Spannungsverteilung¹ vor [Hab09].
- Geklebte Verbindungen weisen gute Dämpfungseigenschaften auf, was vor allem dem geringen Elastizitätsmodul des Klebstoffs geschuldet ist. Außerdem sind durch die mechanischen Eigenschaften elastische Deformationen nicht behindert, was die Möglichkeit hoher dynamischer Beanspruchung bietet und somit zu einer höheren Ermüdungsfestigkeit führt [DB99].
- Der Klebstoff dient zusätzlich als Dichtmittel und verhindert besonders Spaltkorrosion bei engen Zwischenräumen.

¹ In Belastungsrichtung treten infolge der unterschiedlichen Fügeteildehnung, vor allem bei Überlappungsklebungen, Spannungsspitzen auf.

Den genannten Vorteilen stehen eine Vielzahl von zu beachtenden Nachteilen gegenüber:

- In vielen Klebverbindungen liegt keine gleichförmige Spannungsverteilung in Belastungsrichtung vor. Durch die unterschiedliche elastische Dehnung an den Enden der Fügepartner treten dort dimensionierende Spannungsspitzen auf [Sch07].
- Klebverbindungen sind anfällig gegenüber Schälbeanspruchungen, da sie eine geringe Querzugfestigkeit aufweisen.
- Die Festigkeit von Klebstoffen wird durch erhöhte Temperaturen und Feuchtigkeit herabgesetzt.
- Während der Fertigung ist meist eine Bauteil-Vorbehandlung notwendig um eine ausreichende Güte der Klebung zu erreichen. Dabei ist auf eine ausreichende Oberflächenrauigkeit, sowie die Eliminierung korrosiver Medien zu achten [Hab09].
- Über den gesamten Klebprozess ist eine aufwendige Qualitätssicherung erforderlich, da die Klebschichtfestigkeiten eine gewisse Streuung aufweisen. Dies limitiert die Durchführung von geklebten Reparaturen ohne spezielle Vorrichtungen oder Räumlichkeiten². Die Verfestigungszeit der Klebstoffe erhöht zudem die Reparaturzeit [Hab09].
- Zerstörungsfreie Prüfverfahren (Non-destructive testing, NDT) sind nur in geringem Maße einsetzbar [Hab08].

Generell sollte bei der Auslegung einer Klebverbindung auf eine ausreichend große Klebfläche geachtet werden, sodass die Fügung eine höhere Festigkeit als die umgebende Ausgangsstruktur aufweist [DB99]. Zudem sollte die Klebung so ausgelegt sein, dass keine Schälbeanspruchungen auftreten. Werden diese Gestaltungsregeln beachtet, kann Versagen innerhalb der Klebschicht vermieden werden.

Auslegung geklebter Reparaturen

Geklebte Reparaturen werden in der Erstauslegung so gestaltet, dass sie einer einfachen geklebten Fügung³ entsprechen [BDK04]. Je nach Anforderung werden die drei in Abbildung 2.2 (a), (b) und (c) dargestellten mechanischen Ersatzmodelle unterschieden [Sch07].

Einschnittige Überlappungsklebung weisen aufgrund der exzentrisch angreifenden Kräfte ein zusätzliches Biegemoment auf (Abbildung 2.2 d). Dadurch kommt es zu einer Schälbeanspruchung der Klebfläche. Bei symmetrischen Fügungen, zu denen auch zweischnittige Überlappungsklebung zählen, treten hingegen nur geringe zusätzliche Schälbeanspruchungen auf (Abbildung 2.2 b). Bei Schäftungen werden die zu fügenden Teile mit einer schräg zulaufenden Zuschäftung⁴ versehen und verklebt (Abbildung 2.2 a). Im Gegensatz zu Überlappungsklebung treten keine Spannungsspitzen⁵ auf. Ein weiterer Vorteil ist die leichtbaugerechte Geometrie, da keine Materialdopplungen vorhanden sind. Auf weitere besondere Eigenschaften und eine detaillierte mechanische Analyse der Schäftung wird in Kapitel 3 eingegangen.

Bei der Vorauslegung von geklebten Reparaturen wird häufig die Bruchdehnung ϵ_{ult} (Ultimate Design Strain) des Bauteils oder der Strukturregion als Auslegungskriterium herangezogen [BDK04].

² Die Durchführung von geklebten Reparaturen im Falle einer Strukturbeschädigung außerhalb der technischen Basis einer Fluglinie ist daher nur schwierig zu realisieren, weshalb im wirtschaftlich getriebenen Flugbetrieb die Reparatur durch Bolzenverbindung derzeit die einzige Alternative darstellt.

³ Ein Pflaster wird beispielsweise als Überlappungsklebung modelliert. Dabei wird in der Erstauslegung von einem einachsigen Spannungszustand ausgegangen.

⁴ Als Zuschäftung wird die lange, schräge Klebfläche bei einer Schäftung bezeichnet.

⁵ Es muss beachtet werden, dass diese Aussage nur für isotrope Werkstoffe gilt und daher nicht auf die meisten Lamine bezogen werden kann.

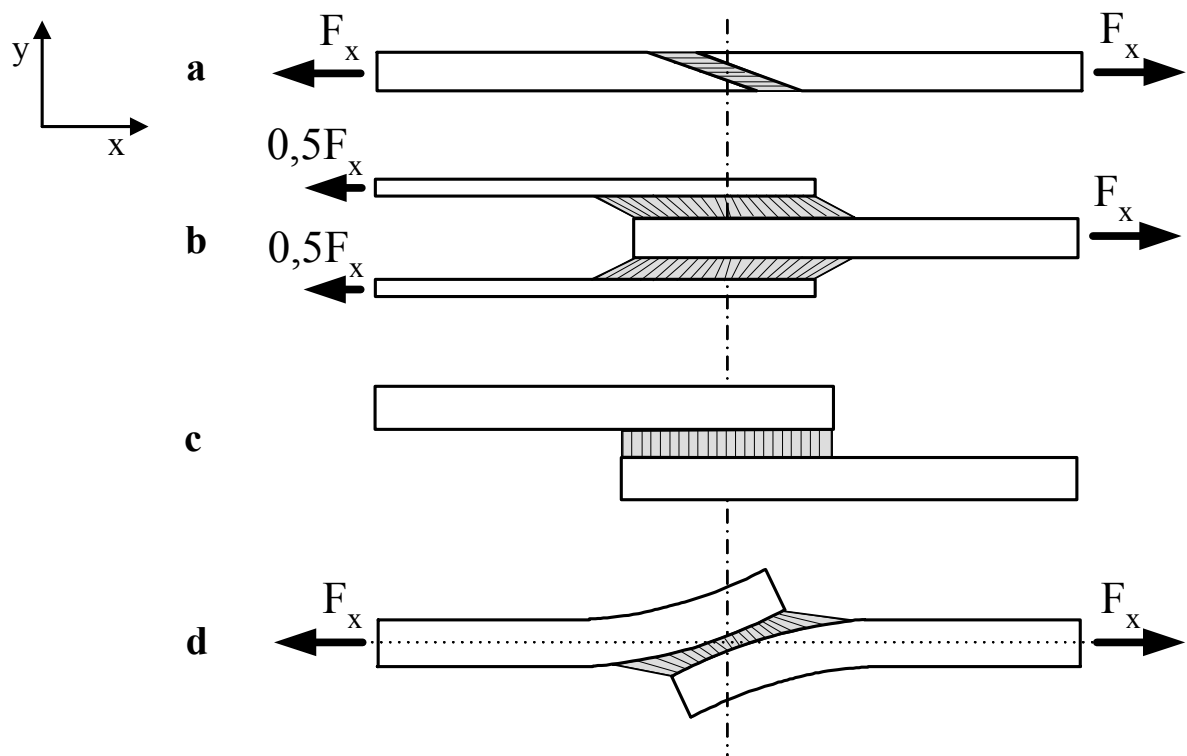


Abbildung 2.2: Übersicht über die mechanischen Klebmodelle. Abbildung (a) zeigt eine Schäftung und Abbildung (b) eine zweischnittige Überlappungsklebung (jeweils auf Zug belastet). In Abbildung (c) ist eine einschnittige Überlappungsklebung dargestellt. In Abbildung (d) erkennt man das zusätzliche Biegemoment, das bei einer Zugbelastung an einer einschnittigen Überlappungsklebung entsteht [Sch07].

Ist diese Information nicht vorhanden, bildet die Bruchdehnung des Ausgangswerkstoffs eine gute Annahme. Die Bruchdehnungen realer Entwürfe liegen bei ca. 0,3–0,4 %. Wie bereits erwähnt, sollte die Auslegung derart gestaltet werden, dass die Festigkeit der Reparaturstelle jene der umgebenen Ausgangsstruktur übersteigt. Dies setzt eine korrekt durchgeführte Klebung und eine Klebschicht ohne Fehlstellen voraus [DB99]. Normalerweise weisen Klebstoffe ein elastisch-plastisches Werkstoffverhalten auf. Dies ermöglicht den Abbau von sich einstellenden Spannungsspitzen bei höherer Belastung. Gleichzeitig werden die Spannungen in den wenig belasteten Mittenbereich umgelagert. Bei der Versagensvorhersage einer Klebverbindung sollte daher ein nicht-lineares Werkstoffverhalten modelliert werden. Die Auslegung muss dennoch so erfolgen, dass nur der linear-elastische Bereich für den Betrieb genutzt wird. Um bei Überschreitung genug Sicherheit bis zum Versagen zu garantieren, muss der Überlappungsbereich ausreichend groß sein, damit sich die Spannungsspitzen umlagern können. Für die Auslegung müssen außerdem Faktoren wie Geometrie der Fügung, versteifenden Elemente der umgebenden Struktur, Schäl- und Normalspannungen, Temperatur- und Feuchtigkeitslangzeitverhalten, exzentrisch angreifenden Kräfte, thermische Eigenspannungen oder bereits bestehende Reparaturen berücksichtigt werden. Um all diese Faktoren zu berücksichtigen, sind dreidimensionale (3D), nicht-lineare Finite-Elemente-Modelle (FE) die einzige Möglichkeit für eine korrekte Auslegung [Sch07].

Einfluss des Klebstoffs

Die Belastungsfähigkeit einer Klebverbindung ist nicht nur von den Fertigungsbedingungen und der Geometrie der Fügung abhängig, sondern in hohem Maße von der Art des Klebstoffs, der Klebschichtdicke⁶ oder der Oberflächenrauigkeit der Fügeteile [Sch07].

Die Auswahl eines geeigneten Klebstoffs erfolgt nach dem Anwendungsfall. Folgende Eigenschaften werden unterschieden [Sch07]:

- Einsatzzweck: Unterscheidung nach den Fügematerialien wie z.B. Holzleim, Papierkleber, Metallkleber, Kunststoffkleber etc.
- Chemische Basis: verbreitet sind Cyanacrylate, Epoxide, Polyetherane, Polyesterharze, Acrylate, Phenolharze.
- Komponentenanzahl: Ein- oder Zweikomponentenkleber
- Aushärtetemperatur: Eine Unterscheidung wird getroffen hinsichtlich der erforderlichen Umgebungstemperatur beim Aushärten. Kalthärtende Klebstoffe härten bei Umgebungstemperatur aus, während warmhärtende Klebstoffe hohe Auslagerungstemperaturen erfordern.
- Konsistenz: Die Konsistenz von Klebstoffen unterscheidet sich in pastöse Klebmassen und Filmklebstoffe.
- Aushärtemechanismus: Unterschieden wird in Reaktionsklebstoffe (zwei oder mehrere chemische Komponenten reagieren miteinander), Schmelzklebstoffe (Thermoplaste, die bei Erhitzung flüssig werden und das Bauteil benetzen), anerobe Klebstoffe (härten nur unter Sauerstoff-Abschluss aus) und strahlungshärtende Klebstoffe (Aushärtereaktion startet bei UV-Lichtbestrahlung).
- Füllstoff: Für bestimmte Anwendungen werden Klebstoffe mit Füllstoffen versetzt, um z.B. den Klebstoff zu verstärken, die chemische Schwindung zu kompensieren, Risse zu vermeiden oder eine gewünschte Klebschichtdicke einzustellen.

Bei Strukturklebungen werden Filmklebstoffe wie Epoxid-, Phenol- oder Acrylatharz verwendet. Der Aushärtvorgang erfolgt unter Druck und Temperatur. Dies garantiert die geforderte konstante Klebschichtdicke und vermindert die Gefahr von Lufteinschlüssen. Teilweise werden dem Klebstoff feine Gitter oder Vliese beigemischt (supported adhesive). Diese dienen der Verstärkung während der Fertigung und verhindern, dass der hochviskose Klebstoff aus der Fuge herausgedrückt wird.

Neben der Klebstoffauswahl sind die mikroskopischen und makroskopischen Wirkmechanismen für die Güte einer Klebverbindung entscheidend. Zum einen entsteht ein Mikro-Formschluss durch Eindringen des Klebstoffs in Poren und Ritzen, zum anderen bilden sich auf atomaren Bindungskräften basierende chemische Verbindungen. Durch Diffusion von Klebstoff- und Fügeteilmolekülen werden diese Verbindungen zusätzlich unterstützt. Diese Art der Festigkeit zwischen verschiedenen Stoffen wird Adhäsivfestigkeit genannt. Für eine ausreichende Adhäsivfestigkeit ist daher die Beschaffenheit der Fügeteil-Oberfläche essentiell. Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor ist die Eigenfestigkeit des Klebstoffs, die sog. Kohäsivfestigkeit.

Entsprechend der Wirkmechanismen wird das Bruchverhalten von Klebverbindungen in drei grundlegende Versagensmechanismen eingeteilt. Diese sind in Abbildung 2.3 dargestellt. Kommt es zu einem Bruch innerhalb der Klebschicht, handelt es sich um einen Kohäsivbruch (Abbildung 2.3 (a)). Dieses Bruchverhalten kann ähnlich wie bei anderen Werkstoffen sowohl als spröde wie auch als zäh beschrieben werden [Hab09]. Sind einseitig auf der Fügeteilfläche keine Klebstoffreste und

⁶ Dies trifft auf Dickschichtklebungen nicht im gleichen Maße wie auf Strukturklebungen zu.

auf der Klebstofffläche keine Fügeiteilreste vorhanden, so handelt es sich um einen reinen Adhäsionsbruch (Abbildung 2.3 (b)). Dies ist eine idealisierte Annahme, da Brüche dieser Form in der Realität nicht auftreten. Sind Klebstoffreste an beiden Fügepartnern vorhanden und ist kein Bruch innerhalb der Klebschicht erfolgt, so spricht man von einem Adhäsionsbruch an beiden Fügeiteilen (Abbildung 2.3 (c)). Ist eine Klebung wie in Abschnitt 2.2.2 beschrieben ausgelegt, so tritt Versagen innerhalb eines der Fügeiteile auf (Abbildung 2.3 (d)).

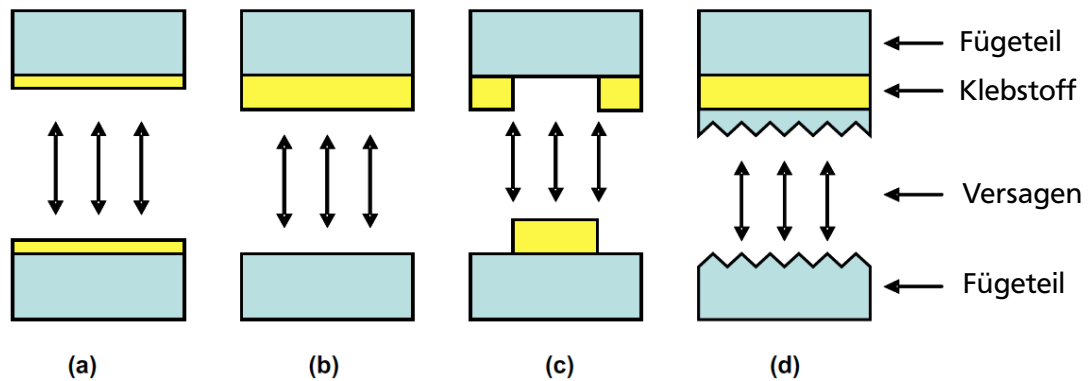


Abbildung 2.3: Verschiedene Versagensmechanismen bei Klebungen: (a) Kohäsivbruch, (b) Adhäsionsbruch, (c) Adhäsionsbruch an beiden Fügeiteilen und (d) Versagen innerhalb eines der Fügeiteile [KJK⁺06].

Erhöhte Temperatur und Feuchtigkeit reduzieren die Klebfestigkeiten bei längerer Belastung. Dem entgegen wirken bei Langzeitbelastung Kriech- und Relaxationsvorgänge, welche mögliche Spannungsspitzen umlagern. Der Einfluss von Feuchtigkeit und Temperatur auf die Klebfestigkeit ist aufgrund der Betriebsbedingungen für die Luftfahrt von besonderer Relevanz. Entsprechende Werkstoffdaten sollten zur genauen Analyse durch Versuche gewonnen werden [Sch07].

Einen besonderen Einfluss auf die Verbindungsfestigkeit einer Klebung hat die Klebschichtdicke. Zwar reduziert eine größere Dicke die entstehenden Schubspannungsspitzen, da die Schubnachgiebigkeit erhöht wird und eine größere Schubverformung ermöglicht. Dies bedeutet jedoch nicht zwangsläufig eine Festigkeitssteigerung. Diese hängt, neben den mechanischen Spannungen, von weiteren Faktoren, wie der Querkontraktion, der thermischen Ausdehnung, dem chemischen Schwund und ggf. von Exzentrizitäten ab. Ist der Klebstoff in seiner Querkontraktion behindert, wie beispielsweise bei dünnen Klebschichtdicken, so wirkt sich dies sogar festigkeitssteigernd aus. Bei dickeren Klebschichtdicken bilden sich größere chemische Schwund-Eigenstressungen aus. Aufgrund der erhöhten Exzentrizität steigern bei einschnittigen Klebungen große Klebschichtdicken zusätzlich die Schäl- und Biegespannungen. Experimente zeigen, dass die ideale Klebschichtdicke zwischen 0,05 und 0,2 mm liegt. Dieser Bereich ist auch die Dicke, welche die längste Zeitstandfestigkeit bis zum Bruch aufweist. Abbildung 2.4 zeigt die Klebfestigkeit τ_B über der Klebschichtdicke d aufgetragen.

Bezüglich der Oberflächenbeschaffenheit beeinflussen zum einen die Rauigkeit, zum anderen die Sauberkeit die Fügungsqualität. Eine erhöhte Rauigkeit bietet dem Klebstoff die Möglichkeit, eine größere Fläche zu benetzen. Die wirksame Oberfläche, d.h. die Oberfläche die mit Klebstoff in Berührung kommt, kann dennoch nur schwer ermittelt werden und ist somit für eine Festigkeitsanalyse nicht nutzbar. Eine zu große Rauigkeit sollte vermieden werden, da die Klebschicht durch zu große Rauigkeitsspitzen unterbrochen wird. Dabei entstehen lokale Spannungsspitzen. Bei FKV-Bauteilen kann die Rauigkeit durch Verwendung von Schleifpapier oder Auflaminieren von Abreißgewebe, welches beim Entfernen vor dem eigentlichen Kleben eine raue Oberfläche generiert, erhöht

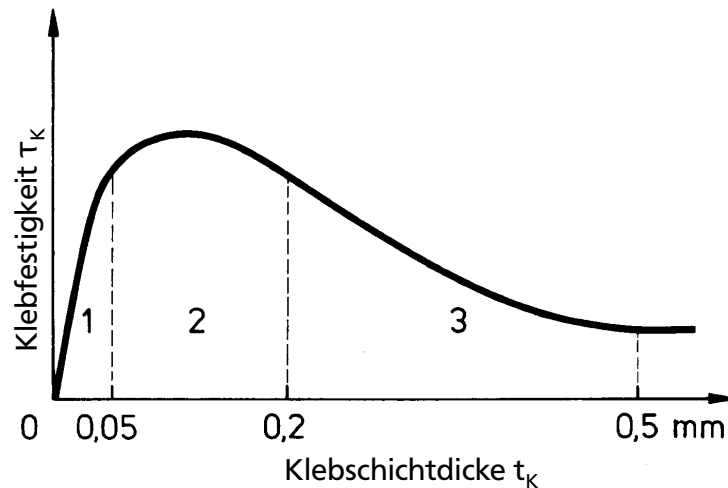


Abbildung 2.4: Abhängigkeit der Schubfestigkeit τ_K der Klebung von der Klebschichtdicke t_K . Im Bereich 1 steigt die Festigkeit an, da sich bei kleinen Dicken zuerst eine ungleichmäßige Klebschicht ausbilden kann. Im Bereich 2 von 0,05–0,2 mm erreicht die Klebschicht ihre Maximalfestigkeit. Steigt die Klebschichtdicke über 0,2 mm im Bereich 3, beginnt ein Abfall der Festigkeit und es stellt sich ab 0,5 mm eine Endfestigkeit ein [Hab09].

werden. Der Gefahr einer unvollständigen Benetzung aufgrund der Rauigkeit kann mit zusätzlich aufgebrachtem Anpressdruck während der Fertigung vorgebeugt werden. Dadurch wird Klebstoff in alle Vertiefungen gepresst und der chemische Reaktionsschwund verringert.

Außerdem ist die Sauberkeit der Klebflächen für die Verbindungsfestigkeit relevant. Im Fall der FKV-Strukturen wird durch das zuvor erwähnte Abreißgewebe während der Fertigung eine Schutzschicht erzeugt, die das Einbringen von Verschmutzungen verhindert. Vor dem eigentlichen Klebprozess sollten die Bauteile mit Fettlösern, wie z.B. Isopropylalkohol, von Fetten, Ölen oder anderen Stoffen mit Trennwirkung, befreit werden. Besonders bei Strukturreparaturen an bereits im Einsatz befindlichen Flugzeugen kann die Kontamination der Oberflächen mit Wasser, Kerosin oder Hydraulikflüssigkeit zu einer signifikanten Verminderung der Klebschichtqualität führen.

3 Geschäftete Klebverbindungen

Die Schäftung nimmt aufgrund ihrer Geometrie innerhalb der Klebverbindungen eine besondere Rolle ein. In diesem Kapitel werden diese spezifischen Eigenschaften gegenüber Überlappungsklebung vorgestellt. Des Weiteren wird auf gegenwärtige und zukünftige Reparaturverfahren eingegangen. Es folgt eine einfache mechanische Analyse der Schäftung bei Zugbeanspruchung, sowie die Vorstellung weiterer analytischer Methoden zur Berechnung der Festigkeit. Abschließend wird auf das Potential lagenvariabler Schäftungswinkel eingegangen.

3.1 Eigenschaften von Schäftungen

In Abschnitt 2.2.2 wurde bereits erwähnt, dass Schäftungen gegenüber Überlappungsklebung von Vorteil sind. Folgende Argumente sprechen für geschäftete Klebverbindungen [Sch07]:

- Durch die schräge Zuschäftung ist die Klebfläche deutlich vergrößert und auftretende Spannungen werden reduziert.
- Bei ausreichend kleinen Schäftungswinkeln wirkt die angreifende Schnittspannung σ_x in der Klebschicht hauptsächlich als Schubspannung τ_θ (siehe Abbildung 3.4). Die Normalspannungen im Klebstoff bleiben klein und sind zu vernachlässigen. Die überwiegend vorkommenden Schubspannungen sind vom Klebstoff gut zu übertragen.
- An den Enden der Schäftung treten keine Spannungsspitzen auf, solange die Fügepartner isotropes Werkstoffverhalten mit gleichen Dehnsteifigkeiten aufweisen.
- Biegemomente oder Schälbeanspruchungen werden durch die auf einer Ebene angreifenden Kräfte vermieden.
- Die Festigkeit bei Zug-, Druck- und Schubbeanspruchung entspricht bei modernen Luftfahrtklebungen annähernd der Festigkeit der unreparierten FKV-Struktur [Har06].
- Bei einer Schäftung ist, leichtbaugerecht, keine Materialdopplung vorhanden (im Ggs. zu Bolzenverbindungen oder Überlappungsklebung).
- Für aerodynamisch hochwertige Flächen, wie im Flugzeugbau vorhanden, ist eine Schäftung vorteilhaft, da keine Stufen auftreten.
- Das Reparaturverfahren ist auch anwendbar, wenn die Schadenstelle nur einseitig zugänglich ist [LTH04].

Ein Nachteil von Schäftungen ist der Fertigungsaufwand. Die Fügepartner müssen exakt bearbeitet werden, um die geringen Winkel und die richtige Reparaturgröße einzustellen. Außerdem ist die Reparaturfläche meist größer als bei vergleichbaren Reparaturen mit Bolzen.

Schäftungen werden üblicherweise in einem Verhältnis von Laminatdicke t (normiert auf eins) zur Schäftungslänge beschrieben. Meist liegt dieses zwischen 1:20 und 1:60. Abbildung 3.1 zeigt beispielhaft den Querschnitt einer solchen Schäftung.

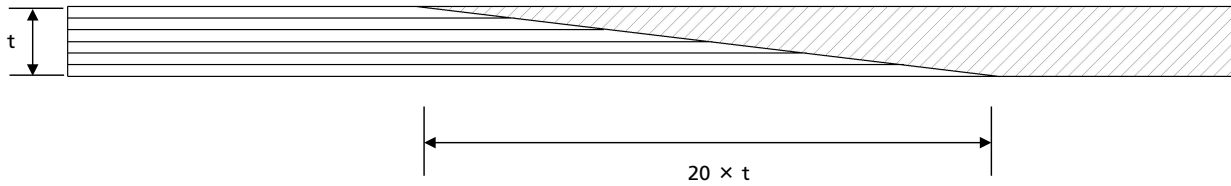


Abbildung 3.1: Geometrisches Verhältnis einer 1:20-Schäftung

3.2 Schäften als Reparaturverfahren

Die gängigen Reparaturquerschnitte bei denen Schäften verwendet werden sind auf drei grundlegende geometrische Formen reduzierbar. Zur Vereinfachung wird von einer einachsigen Zugbelastung ausgegangen. Normalerweise bestehen beide Fügepartner aus denselben Werkstoffen oder besitzen die gleichen mechanischen Eigenschaften, da ansonsten die in der Klebung der Schäftung auftretenden Spannungen zusätzlich erhöht werden. Die üblicherweise verwendeten Geometrien sind in Abbildung 3.2 neben der sich jeweils bei einer Zugbelastung in der Klebschicht einstellenden Schubspannung dargestellt. Abbildung 3.2 a) zeigt zum Vergleich die sich einstellende Schubspannung in einer Überlappungsklebung. Deutlich sind die sich einstellenden Schubspannungsspitzen am Rand der Überlappung zu erkennen, die sich aus der unterschiedlichen Dehnung der Fügeteile entlang der Überlappungslänge L ergeben. Bei realen Reparaturen würde diese Geometrie einem geklebten Pflaster entsprechen. Eine Zwischenstufe zwischen Überlappungsklebung und Schäftung stellt die in Abbildung 3.2 b) gezeigte Stufenschäftung dar. Die über den Querschnitt herrschende Schubspannung τ_{AVG} ist niedriger. Dennoch treten, wie bei der reinen Überlappungsklebung, Schubspannungsspitzen auf. Die reine Schäftung, dargestellt in Abbildung 3.2 c) weist bei einer Zugbelastung annähernd keine Spannungsspitzen auf. Dies liegt an einer mit der Zuschäftung verbundenen Steifigkeitsminderung und damit gleichmäßigen Dehnung auf beiden Seiten der Klebung¹. Die über die Klebschicht herrschende mittlere Schubspannung τ_{AVG} ist außerdem niedriger als die der Überlappungsklebung und der gestuften Schäftung. Eine abgewandelte Form der reinen Schäftung ist die doppelte Schäftung, dargestellt in Abbildung 3.2 d).

Aufgrund der bereits in Abschnitt 3.1 genannten Vorteile eignet sich die reine Schäftung für die Herstellung einer glatten Oberfläche und somit insbesondere zur Reparatur von Flugzeugstrukturen. Beispielhaft wird im Folgenden ein Reparaturverfahren mit einem Prepreg-Flicken bei einer Beschädigung eines CFK-Hautelements (d.h. ohne Stringerversteifung) vorgestellt [Niu92]:

1. Inspektion der beschädigten Fläche und Ermittlung der Schadensgröße
2. Entfernung der Beschädigung durch Schleifen oder Herausschneiden der beschädigten Struktur
3. Trocknen und Säuberung der Oberfläche zur Vorbereitung der Klebung mit einem Reinigungsmittel
4. Herstellung eines Flickens entsprechend des Original-Lagenaufbaus. Grundsätzlich kann dieser aus Prepreg oder aus von Hand getränktem Laminat bestehen [LTH04].
5. Um ein Durchfallen des Flickens zu verhindern, muss auf der Rückseite eine Laminatunterlage (z.B. mit Schraubnadeln) angebracht werden.
6. Einlegen eines passenden Filmklebstoffs in die Schäftung
7. Herstellung des Vakuumaufbaus

¹ Die Voraussetzung ist ein isotropes Werkstoffverhalten der beiden Fügepartner.

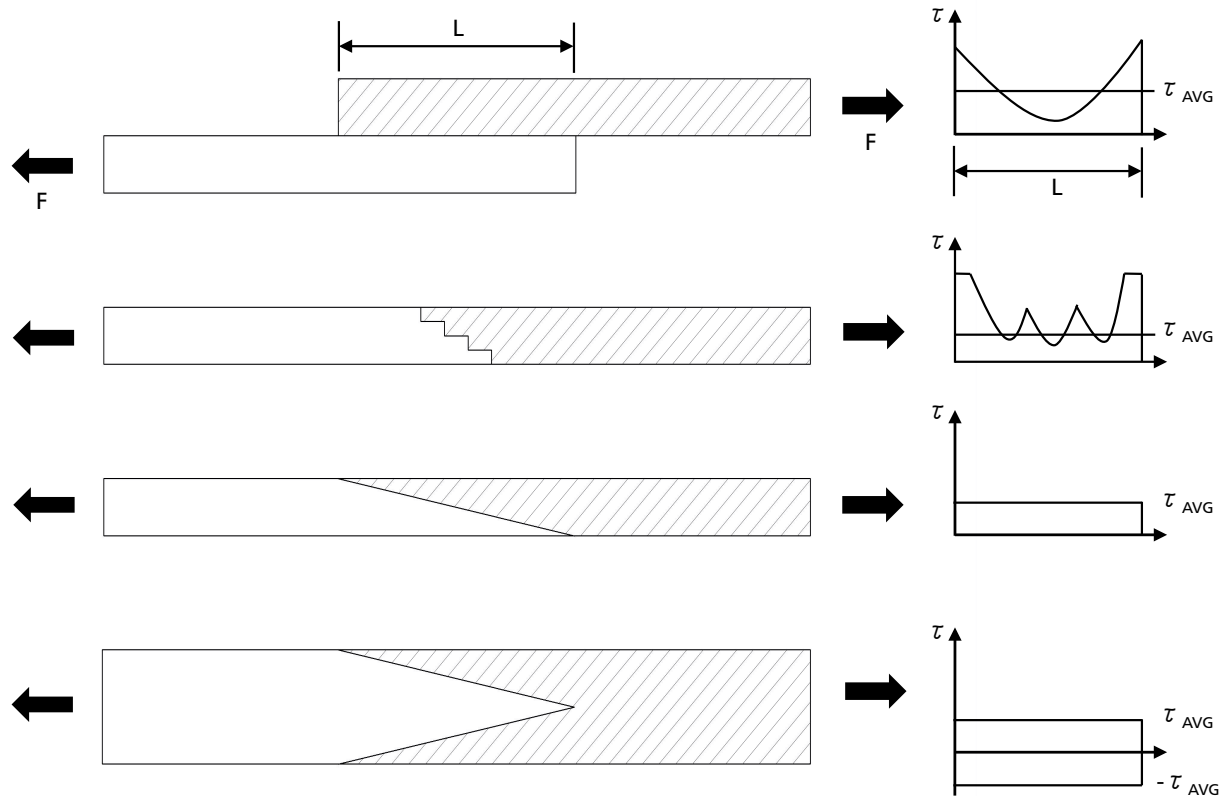


Abbildung 3.2: Verschiedene Schäftungsgeometrien und die sich jeweils bei reiner Zugbeanspruchung in der Klebschicht einstellende Schubspannung im Vergleich zur Überlappungsklebung [BDK04].

8. Aushärten des Harzes durch Heizmatten oder -strahler. Auch Autoklavprozesse sind bei demontierbaren Bauteilen möglich.
9. Inspektion der Reparaturstelle mithilfe geeigneter NDT-Verfahren (z.B. Ultraschall)

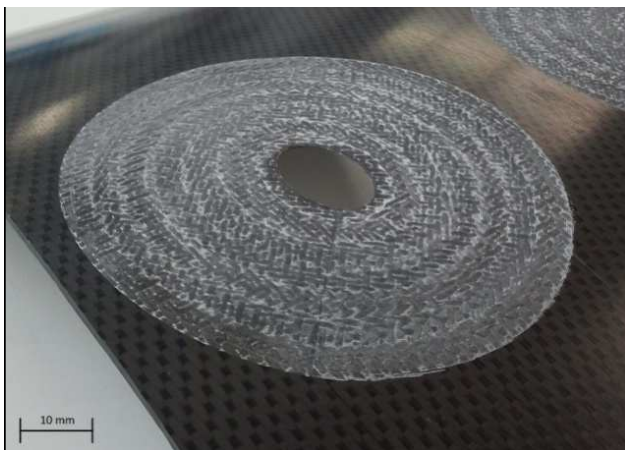
Bei derzeit gängigen Reparaturverfahren erfolgt das Ausschleifen der Schadensstelle (Schritt 2 des Prozesses) und die Herstellung der gewünschten Geometrie händisch. Für eine ausreichende Fertigungsqualität sind daher hochqualifizierte Fachkräfte notwendig, besonders bei komplexen Schäftungen an gekrümmten Bauteilen. So muss beispielsweise aufgrund der sichtbaren Lagenorientierung abgeschätzt werden, ob die Zuschäftung in einer Lage den korrekten Winkel besitzt. In den letzten Jahren wurden Verfahren entwickelt, bei denen Fräsmaschinen die teils komplizierten Schäftungsgeometrien herstellen. Ein Vorteil ist die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit des Fräsprozesses gegenüber dem Handverfahren. Es ist dabei möglich, komplexe Schäftungen auf gekrümmten Bauteilen zu erstellen und Daten für eine nachhaltige Qualitätssicherung zu gewinnen. Der Nachteil besteht darin, dass Bauteile zum Einspannen in die Fräse demontiert werden müssen. Dies ist bei Sekundärstrukturteilen meist möglich, allerdings nicht bei Elementen der Primärstruktur. Im Rahmen aktueller Forschungs- und Entwicklungsprojekte werden daher mobile Fräsen entwickelt. Diese erlauben den direkten Einsatz beispielsweise auf der Außenhaut eines Flugzeugs. Am *Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik* des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) wird daher im Rahmen des Forschungsvorhabens CAIRE (Composite Adaptable Inspection and REpair) ein komplett neuer, automatisierter Schäftungsprozess entwickelt [HP12].

Dieser umfasst folgende Schritte:

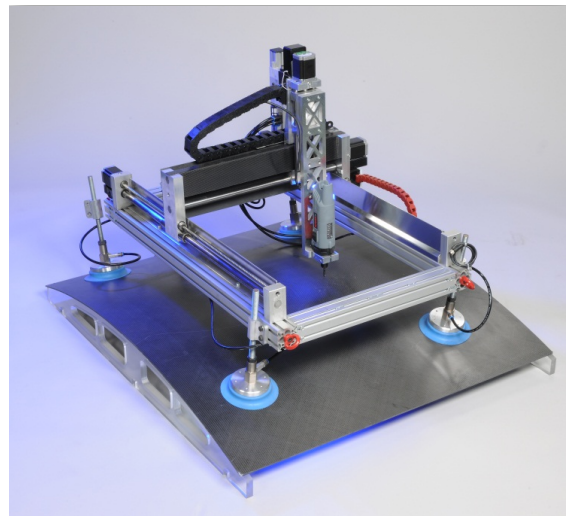
1. Automatisierte Messung der Geometrie
2. Rekonstruktion der Oberfläche in einem CAD-Programm
3. Virtuelle Auslegung der Schäftung
4. Erstellen der Fräsdaten
5. Herstellung der Schäftung

Die virtuelle Auslegung der Schäftung soll später mithilfe einer FE-Analyse durchgeführt werden und ermöglicht die ideale Anpassung der Schäftungsgeometrie an die im Bauteil vorherrschenden Belastungen. Dadurch wird zum einen die Festigkeit erhöht und gleichzeitig die übermäßige Entfernung unbeschädigten Ausgangswerkstoffs verringert.

Der Hauptbestandteil des genannten Projektes ist die Entwicklung einer portablen Fräse. Dazu wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens eine ca. 40 kg schwere 3-achsige Portalfräse entwickelt, welche mittels Saugnäpfen an der Struktur befestigt wird. Abbildung 3.3 (b) zeigt die Fräse im aktuellen Stand der Entwicklung. Die Geometrie der Oberfläche wird durch einen integrierten Laser ermittelt. Die Fräse kann in einem Radius größer 400 mm Reparaturen durchführen, wobei derzeit eine Genauigkeit von unter 0,075 mm erreicht wird. Die Software ist ebenfalls eine Eigenentwicklung und basiert auf dem CAD-Programm *CATIA* [HP12].



(a) Schäftung in einer gekrümmten CFK-Platte



(b) Am DLR entwickelte Fräse

Abbildung 3.3: Bei einer Schäftung in einer gekrümmten CFK-Platte treten deutlich die unterschiedlichen Lagen aufgrund der variierenden Faserorientierung zum Vorschein (a) [Pot12]. Die am DLR entwickelte Portalfräse wird mithilfe von Saugnäpfen auf der Oberflächenstruktur befestigt (b) [HP12].

3.3 Mechanische Analyse von Schäftungsverbindungen

Für die Auslegung einer Schäftungsverbindung ist die zu erwartende Belastung der Klebschicht und eine mögliche Versagenslast bei reiner Zugbelastung von zentraler Bedeutung. Es wird eine zweidimensionale (2D) Spannungsanalyse durch einfache Kraftzerlegung und Koordinatentransformation an einem Zugstab durchgeführt.

Die Fügepartner sind in Abbildung 3.4 dargestellt. Zunächst wird davon ausgegangen, dass beide Fügepartner dieselbe Dehnsteifigkeit aufweisen. Gedanklich wird die Klebschicht parallel der Zuschäftung durchgeschnitten. Diese Schnittfläche A_θ dient als Referenz für ein um den Winkel θ gedrehtes x_θ, y_θ -Koordinatensystem. Die Orientierung dessen ist durch die Normale der Schnittfläche definiert.

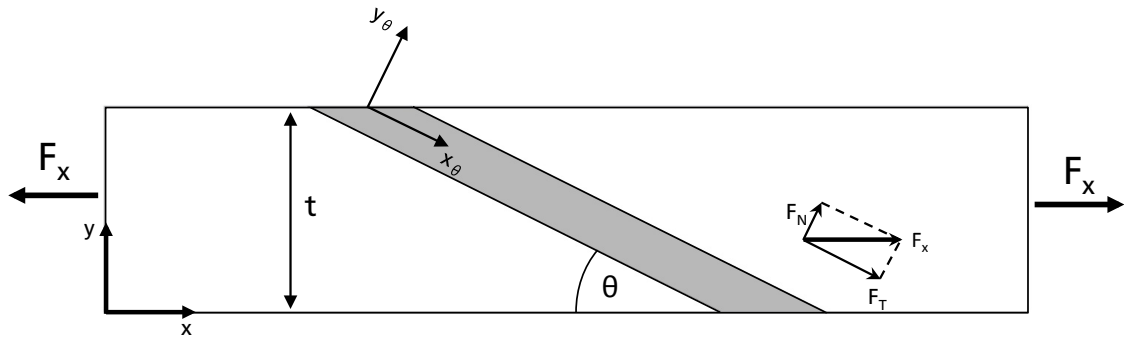


Abbildung 3.4: Prinzipskizze einer einfachen Schäftung in einem Zugstab. Mittels Kraftzerlegung werden die in der Klebschicht auftretenden Normal- und Schubspannungen ermittelt.

Die an den Enden der Fügepartner angreifende Kraft F_x wird in eine Normalkraft F_N und eine Tangentialkraft F_T zerlegt. Damit ergibt sich:

$$F_N = F_x \cdot \sin\theta \quad (3.1)$$

$$F_T = F_x \cdot \cos\theta \quad (3.2)$$

Die Kräfte werden zur Spannungsbestimmung auf die Schnittfläche A_θ bezogen. Dazu wird die Querschnittsfläche $A = b \cdot t$ des Zugstabes herangezogen, wobei b als Probenbreite und t als Probenhöhe definiert ist:

$$A_\theta = b \cdot \frac{t}{\sin\theta} = \frac{A}{\sin\theta} \quad (3.3)$$

Die Normalspannung ergibt sich damit zu:

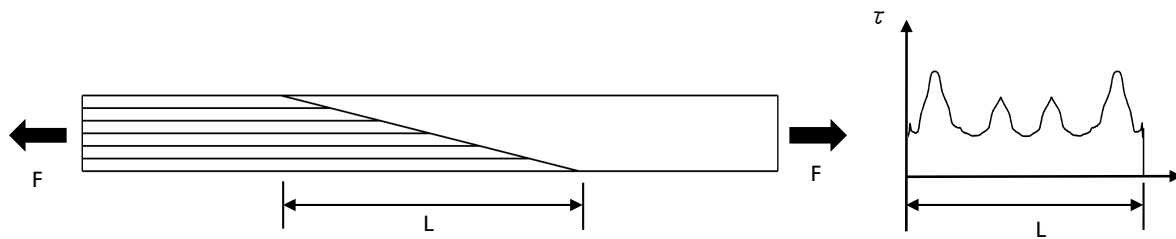
$$\sigma_\theta = \frac{F_N}{A_\theta} = \frac{F_x \cdot \sin\theta}{A/\sin\theta} = \sigma_x \cdot \sin^2\theta \quad (3.4)$$

Die Schubspannung errechnet sich aus:

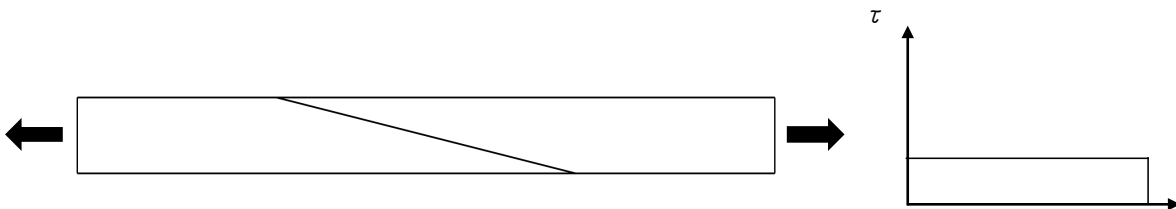
$$\tau_\theta = \frac{F_T}{A_\theta} = \frac{F_x \cdot \cos\theta}{A/\sin\theta} = \sigma_x \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta = \frac{1}{2} \sigma_x \cdot \sin 2\theta \quad (3.5)$$

F_T ist dabei die Kraft deren Richtung parallel zur Schnittfläche A_θ verläuft. Die Größe der Normal- und Schubspannung in einer Schäftung ist bei dieser vereinfachten Betrachtung unabhängig von der Klebschichtdicke. Für isotrope Fügepartner (z.B. Aluminium) ergeben sich eine konstante Schub- und Normalspannung über die Länge der Klebung. Neben der aufgetragenen Kraft sind beide Spannungen nur vom Schäftungswinkel θ abhängig. Je geringer dieser Winkel ist, desto geringer sind die auftretenden Spannungen. Versagen in der Klebschicht tritt auf, sobald die durchschnittliche Schubspannung die Schubfestigkeit des Klebstoffs erreicht hat.

Bei Schäftungen von FKV-Fügepartnern tritt bei einer Zugbelastung hingegen keine konstante Spannung auf, da es sich bei Laminaten mit Lagen unterschiedlicher Faserorientierung prinzipiell



(a) Schäftung zweier Fügepartner aus FKV-Werkstoff



(b) Schäftung zweier Fügepartner aus isotropem Werkstoff

Abbildung 3.5: Prinzipskizze einer Schäftung zweier Fügepartner aus FKV (a) und isotropem Werkstoff (b). Daneben ist jeweils der dazugehörige Schubspannungsverlauf entlang der Klebschicht aufgetragen.

um anisotrope Werkstoffe handelt. Aufgrund der damit verbundenen verschiedenen Steifigkeiten in globaler x-Richtung der Probe, stellen sich deutliche Spannungsüberhöhungen in der Klebschicht ein. Abbildung 3.5 zeigt eine Prinzipskizze des Spannungsverlaufs in der Klebschicht einer Schäftung mit Fügepartner aus FKV-Werkstoff im Vergleich zu einer Schäftung zweier Fügepartner aus isotropem Werkstoff. Deutlich sind die entstehenden Spannungserhöhungen entlang der Klebschicht zu erkennen. Die höchste Spannung zeigt sich dabei an den 0° -Lagen, da dort der Steifigkeitsunterschied zwischen den dehnsteifen 0° -Lagen und dem dehnweichen Klebstoff am größten ist. Die Höhe dieser Spannungsspitzen hängt vom Lagenaufbau und der Dicke des Laminats ab.

In [WG07] zeigen WANG und GUNNION mithilfe einer FE-Analyse die Spannungsverteilung bei verschiedenen Laminaten. Diese ist in Abbildung 3.6 dargestellt. Die x-Achse zeigt die normalisierte Länge der Schäftung. Auf der y-Achse ist die Spannungskonzentration als Quotient der lokalen Schubspannung $\tau(x)$ zur durchschnittlichen Schubspannung τ_{AVG} aufgetragen. Das simulierte quasi-isotrope Laminat besteht aus unidirektionalen (UD) Lagen, die Stapelfolge ist $[45/0/-45/90]_{ns}$, wobei n 1,2 und 3 den verschiedenen Dicken entspricht. Der Schäftungswinkel beträgt $\theta = 5^\circ$. Der Verlauf der Schubspannungskonzentration zeigt aufgrund des Lagenaufbaus, dass die höchsten Spannungskonzentration in den 0° -Lagen auftreten und von der Dicke des Laminats abhängen.

Bei spröden Klebstoffen versagt die Verbindung, sobald die Schubfestigkeit an einem Punkt innerhalb der Klebschicht erreicht wurde. Dies muss bei der Reparaturauslegung beachtet werden. Bei duktilen Klebstoffen wird die Festigkeit der Verbindung von der maximalen Scherdehnung bestimmt. Diese kann an einigen Stellen bereits überschritten werden, bevor die durchschnittliche Scherdehnung den maximalen kritischen Wert erreicht. Die plastischen Eigenschaften des duktilen Klebstoffs ermöglichen auf der anderen Seite eine Abschwächung der Spannungsspitzen hin zu einer gleichmäßigeren Spannungsverteilung. Daher ist es sinnvoll in der Festigkeitsvorhersage die elastisch-plastische Verformung zu berücksichtigen, da eine reine Auslegung nach elastischer Analyse zu konservativ ausfällt [WG09].

ERDOGAN und RATWANI [ER71], sowie HART-SMITH [HS73], entwickelten genauere analytische Lösungsmethoden zur Bestimmung des Spannungsverlaufs in einer Schäftung mit zwei anisotropen Fügepartnern. Diese 2D-Modelle sind jedoch nur numerisch lösbar, da keine geschlossene analyti-

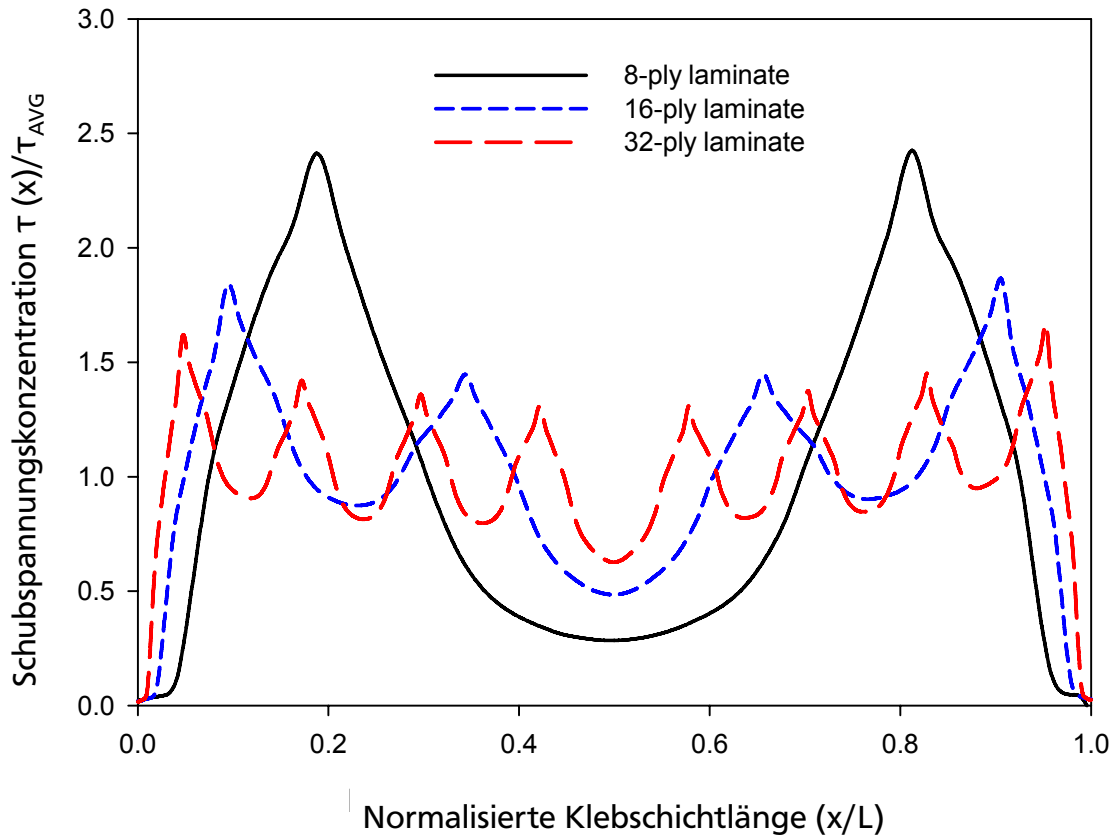


Abbildung 3.6: Schubspannungsverlauf in einer Schäftung mit konstantem Schäftungswinkel $\theta = 5^\circ$ und unterschiedlicher Lagenanzahl. Das quasi-isotrope Laminat hat den Lagenaufbau $[45/0/-45/90]_{ns}$ [WG07].

sche Lösung bekannt ist. Beide Studien zeigen jedoch ebenfalls, dass die Spannungsverteilung bei einer Schäftung mit FKV-Bauteilen nicht konstant ist. Auch hier werden die Spannungsspitzen in den 0° -Lagen aufgezeigt und beweisen, dass die äußere Last vor allem über diese Bereiche übertragen wird.

3.4 Variation des Schäftungswinkels

Bei heutigen, hoch-belasteten FKV-Strukturen werden Schäftungsverhältnisse von 1:20 bis 1:60 verwendet, um die ursprüngliche Verbindungsfestigkeit vollständig wiederherzustellen [WG07]. Um diese Verhältnisse zu erreichen, ist es notwendig viel Ausgangswerkstoff zu entfernen, um die Anschäftung mit dem korrekten Winkel zu garantieren. Der Schäftungswinkel θ wird dabei von den am höchsten belasteten Lagen diktiert, vorzugsweise den 0° -Lagen. In [KSS⁺06] wurden Schäftungen mit verschiedenen Schäftungswinkeln θ von $0,5^\circ - 4^\circ$ experimentell auf ihre Verbindungsfestigkeit hin untersucht. Wie zu erwarten, erhöhte sich diese mit sinkendem Winkel θ . Zu beobachten war außerdem, dass abhängig vom Schäftungswinkel, unterschiedliche Versagensarten vorherrschten. Bei $\theta < 1^\circ$ herrschte Faserbruch des Laminats vor, bei $\theta > 1^\circ$ kohäsives Versagen der Klebschicht.

Die Auslegungsphilosophie bei der sich θ nach der Steifigkeit der 0° -Lagen richtet, gilt bei quasi-isotropen Laminaten auch für 3D-Anwendungen, da in allen Richtungen dieselbe Steifigkeitsverteilung vorherrscht. Daher ist es zulässig, den kritischen, für den 2D-Fall ermittelte Schäftungswinkel, auf den 3D-Fall zu übertragen [WG09]. Bei anisotropen Laminaten kann dieser Winkel allerdings zu konservativ angenommen sein, da die Festigkeit in verschiedenen Richtungen variiert. Außerdem

wird nicht beachtet, dass ein Teil der Last von der die Reparatur umgebenden Struktur und nicht durch die Klebschicht aufgenommen wird. Da ein Großteil der in der Luftfahrt angewendeten Lamine anisotrop² ist, kann es relevant sein, die 3D-Form einer Schäftung zu optimieren, um eine gleichmäßige Klebfestigkeit in allen Richtungen für einen vorliegenden zweiachsigen Spannungszustand zu erreichen. Durch diese Optimierung ist es außerdem möglich, die Entfernung unbeschädigter Ausgangsstruktur zu verringern. In [WG09] wurde die optimale Form einer Schäftung für zweiachsige Spannungszustände von WANG und GUNNION mit numerischen Methoden eingehend untersucht. BREITZMAN ET AL. untersuchte in [BIC⁺09] eine 3D-Geometrie für Schäftungen mit verschiedenen Lagenaufbauten. In der vorliegenden Arbeit wird zunächst ausschließlich der 2D-Fall bei einachsiger Zugbelastung betrachtet, um den Einfluss spezieller 3D-Effekte auf die Ergebnisse gering zu halten.

Wie zuvor in Abbildung 3.6 gezeigt, variiert die sich einstellende Schubspannung in der Klebschicht in Abhängigkeit von der Faserrichtung der Lagen. Mit abnehmenden θ können diese allerdings verringert werden. Eine Anpassung des lokalen Schäftungswinkels an das vorhandene Spannungsniveau hat dementsprechend eine Senkung der lokalen Schubspannungsspitzen in der Klebschicht zur Folge. Dadurch kann die Spannungsverteilung, angenähert an die Verteilung bei der Verklebung zweier isotroper Fügepartner, gleichmäßiger verteilt werden. Die Realisierung einer solchen variablen Schäftung hat zur Folge, dass die Verbindungsfestigkeit gesteigert wird, da ein Versagen aufgrund der gesenkten Spannungsspitzen erst bei höherer Last auftritt. Alternativ ist eine Reduzierung der Reparaturfläche bei Erhaltung der Festigkeit einer konstanten Schäftung möglich. Durch die größeren Winkel in den weniger belasteten 45°- und 90°-Lagen sinkt die Gesamtreparaturlänge. Abbildung 3.7 zeigt den Vergleich einer konstanten, zu einer variablen Schäftung. Der Schäftungswinkel ändert sich je nach Faserorientierung der einzelnen Lage. Ein Reparaturverfahren mit einer solchen Klebschichtgeometrie setzt eine geringe Fertigungstoleranz voraus. Durch die in Abschnitt 3.2 vorgestellte portable Fräse ist diese Fertigungsgenauigkeit möglich.

In den nächsten Kapiteln wird eine grundlegende Analyse des Potentials lagenvariabler Schäftungen mithilfe numerischer Simulationen und experimenteller Untersuchungen durchgeführt. Als Prüfkörper dienen genormte CFK-Couponproben. Dabei werden die Einflüsse unterschiedlicher Schäftungswinkel, Klebschichtgeometrien und Lagenaufbauten auf die Schubspannungsverteilung in der Klebschicht und die Verbindungsfestigkeit bei einachsiger Zugbelastung untersucht.

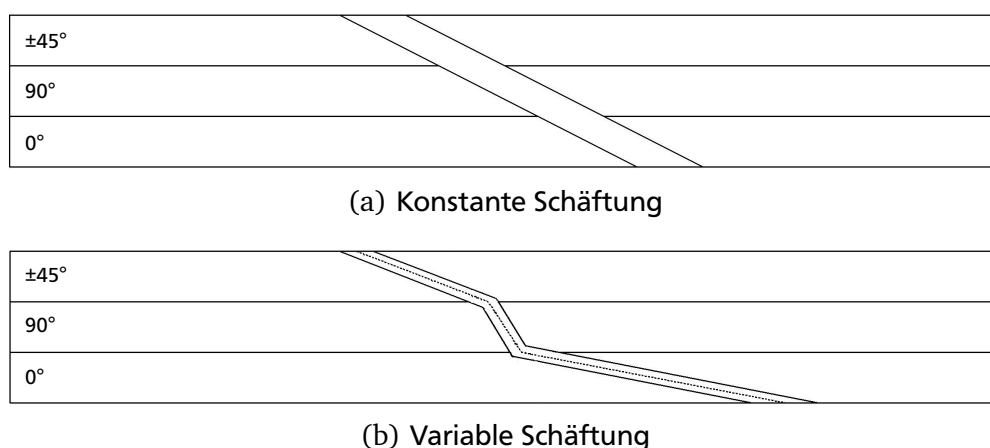


Abbildung 3.7: Prinzipskizze einer konstanten (a) und einer variablen Schäftung (b). Die Schäftungswinkel sind den einzelnen Lagen angepasst.

² Viele äußere Flugzeugstrukturen besitzen anisotrope Lamineigenschaften, da durch eine angepasste Stapelfolge Steifigkeits- und Festigkeitsanforderungen erreicht werden [WG09].

4 Methoden und Werkstoffe

Ziel der numerischen und experimentellen Untersuchungen ist es, die Qualität und Möglichkeiten geschäfteter, winkel-variabler Klebverbindungen zweier anisotroper Fügepartner zu analysieren. Zunächst wird auf die in diesem Kapitel verwendeten genormten Prüfkörper und die Nomenklatur eingegangen. Anschließend werden die Werkstoffkennwerte der Lamine und des Klebstoffs vorgestellt. Im letzten Abschnitt wird die Geometrie der variablen Schäftung analysiert.

4.1 Prüfkörper und Nomenklatur

Bei der Auslegung von FKV-Strukturbauteilen wird nach der in Abbildung 4.1 dargestellten Testpyramide vorgegangen [BDK04]. Für die Ermittlung der grundlegenden Werkstoffeigenschaften und -kennzahlen werden Couponproben gefertigt und geprüft. Diese spiegeln jedoch nicht die komplexen mechanischen Verhältnisse in einem gesamten Bauteil oder einer Strukturgruppe wider. Daher ist es notwendig, die Komplexität der Prüfkörper bis hin zur gesamten Baugruppen schrittweise zu erhöhen und entsprechend zu prüfen.

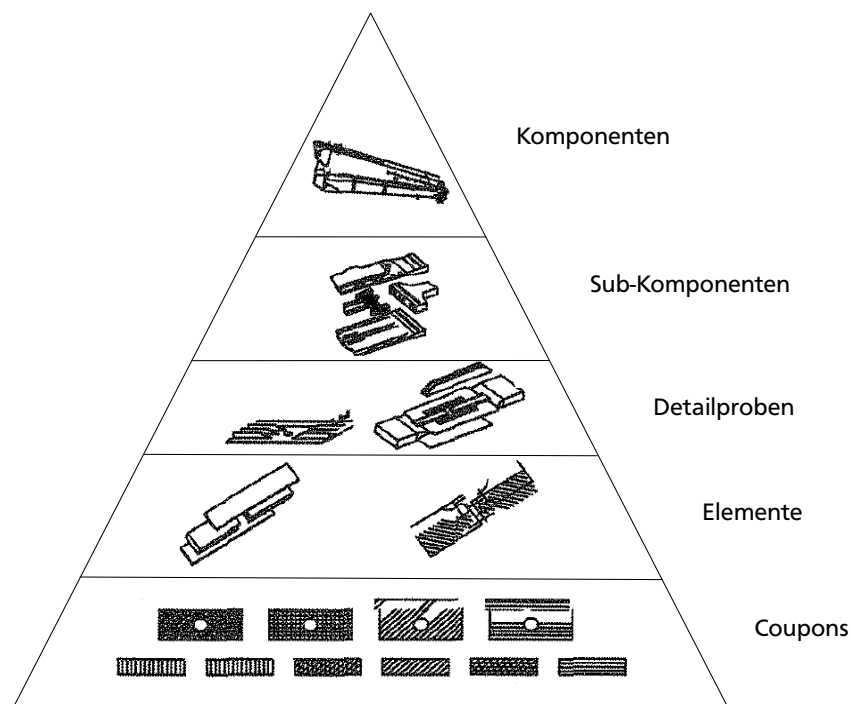


Abbildung 4.1: Versuchspyramide für FKV-Strukturen. Die Couponproben bilden die erste Stufe des Versuchsprozesses [BDK04].

Für die grundlegende Festigkeits- und Spannungsanalyse der winkelvariablen geschäfteten Verbindung ist die Durchführung von Zugversuchen an einfachen Couponproben ausreichend. Die Durchführung der Untersuchungen in dieser Arbeit erfolgt in zwei Schritten: In einem ersten Schritt werden die Festigkeit und das Spannungsniveau innerhalb der Klebschicht mithilfe einer FE-Simulation analysiert. Dabei wird in einem 3D-Modell die Probe einem virtuellen Zugversuch

unterzogen. Durch die numerische Simulation ist es möglich, geeignete winkelvariable Schäftungsgeometrien und die Verbindungsfestigkeit der Klebschicht beeinflussende Parameter zu identifizieren (siehe Abschnitt 4.3.2). In einem zweiten Schritt wird ein Couponprobenprogramm aufgrund der in der Simulation ermittelten geeigneten Schäftungsgeometrien erstellt und in einem Zugversuch getestet. Damit ist die experimentelle Validierung der zuvor ausgelegten Klebschichtgeometrien möglich. Als Grundlage für die Probengeometrie dient die Norm *prEN 6066* [AEC95]. Die geometrischen Abmessungen sind in Abbildung 4.2 dargestellt. Die Probe soll eine Länge von $l = 280$ mm aufweisen; die Breite der Probe soll in einem Bereich von $b = 25,4 \pm 0,2$ mm liegen. Der Bereich innerhalb der Einspannung soll eine Länge von $l_f = 180$ mm betragen, der Bereich der eigentlichen Schäftung $l_s = 80 \pm 3$ mm. Die an den Seiten der Einspannung dargestellten Pflaster sind optional.

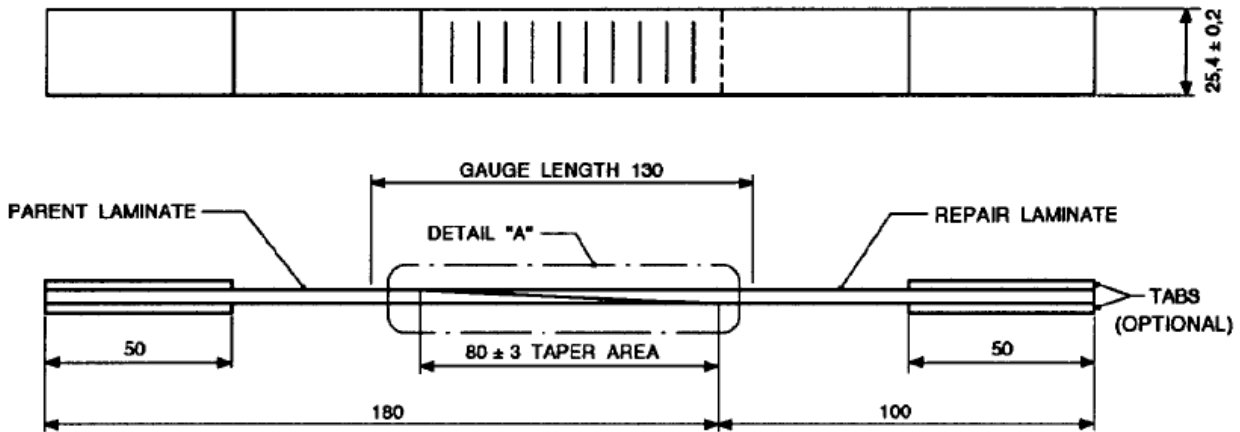


Abbildung 4.2: Geometrische Abmaße der Couponproben gemäß AECMA Norm *prEN 6066* [AEC95]. Alle Angaben sind in Millimeter.

Da die in Flugzeugen verwendeten CFK-Strukturen während eines Fluges verschiedenen Umwelteinflüssen, wie Feuchtigkeits- oder Temperaturschwankungen, ausgesetzt sind, werden Couponproben üblicherweise auf diese Einflüsse hin untersucht. Dabei kann zum einen die Prüftemperatur variieren, zum anderen die Luftfeuchtigkeit der Umgebung. In dieser Arbeit werden Proben bei Umgebungsbedingungen, d.h. Raumtemperatur (23°C) und trockener Konditionierung (Room Temperature Dry, RTD), sowie bei erhöhter Umgebungstemperatur (100°C) und ebenfalls trockener Konditionierung (Elevated Temperature Dry, ETD), geprüft. Bei beiden Prüfungen beträgt die Luftfeuchtigkeit 50 %. Üblicherweise ist ebenfalls eine Prüfung von Proben bei erhöhter Temperatur und feuchter Konditionierung (Elevated Temperature Wet, ETW) erwünscht. Dies war aus Fertigungs- und Zeitgründen im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht möglich.

Die Nomenklatur der Probekörper richtet sich nach den Vorgaben des DLR [WW13]. Wesentliche Angaben sind die Projektbezeichnung, der Lagenaufbau, die Angabe der Prüfmethode, die Umgebungsbedingungen und eine laufende Probennummer. Eine beispielhafte Aufschlüsselung ist in Abbildung 4.3 dargestellt.

Die Angaben zu Projektbezeichnung, Bezeichnung des Prepregs, Prüfmethode und Konditionierung bleiben bei allen Proben gleich. *TEN* steht für den Zugversuch (tension test). Der in Abschnitt 4.2 vorgestellte Lagenaufbau wird mit 1 und 3 bezeichnet. Für die Umgebungstemperatur bei der Prüfung gibt es zum einen die Bezeichnung *RT* für RTD-Bedingungen (23°C) und *100* für ETD-Bedingungen (100°C). Bei der Schäftungsgeometrie steht *V* für eine variable und *K* für eine konstante Schäftung. Die einzelnen Schäftungsgeometrien und ihre Bezeichnungen werden im weiteren Verlauf der Arbeit vorgestellt. Dabei ist zu beachten, dass die laufende Probennummer nur in der experimentellen Untersuchung für die Unterscheidung der einzelnen Zugproben aufgeführt wird. Bei den Simulationen wird dieser Endteil entfernt. Außerdem werden zur besseren Übersicht

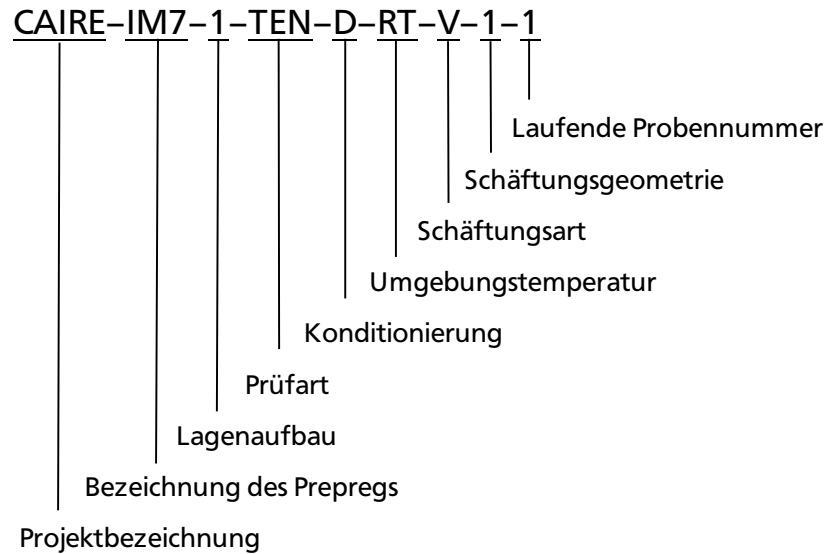


Abbildung 4.3: Nomenklatur für die Bezeichnung der Probekörper. Als Grundlage dient die Verfahrensanweisung gemäß [WW13].

die zuvor genannten gleichbleibenden Anteile der Bezeichnung nicht immer aufgeführt. Vor den Lagenaufbau wird in diesem Fall ein *QI* (quasi-isotrop) gesetzt, damit die Kennzeichnung als Laminat erkennbar ist. Das in Abbildung 4.3 aufgeführte Beispiel verkürzt sich somit zu *QI1-RTV-1-1*.

4.2 Werkstoffkennwerte

In den folgenden Abschnitten werden die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Werkstoffkennwerte der Lamine und des Klebstoffs vorgestellt. Zusätzlich werden die Ergebnisse eines Zugversuch mit geschäfteten 1:20-Referenzproben aufgeführt.

4.2.1 Lamine

Die zur Herstellung der Couponproben verwendeten Lamine sind typisch für die im Flugzeugbau vorhandenen CFK-Strukturen. Sie bestehen aus einem Prepreg der Marke *Hexcel 8552 IM-7* mit einem Epoxidharzsystem. Das Prepreg ist als UD-Gelege vorhanden. Die in der Simulation angenommenen Werkstoffkennwerte wurden aus verschiedenen Quellen gemittelt [Wö14][NMS13][CMD07]. In Tabelle 4.1 werden die Werkstoffwerte (Elastizitätsmodul *E*, Querkontraktionszahl ν und Schubmodul *G*) der UD-Lage für RTD-Prüfbedingungen aufgeführt. Die angegebenen Elastizitäts- und Schubmoduln wurden auf die erste Stelle vor dem Komma gerundet.

Die in Tabelle 4.2 aufgeführten Werte sind die Werkstoffkennwerte in einer RTW-Umgebung. Die Daten stammen aus [Mar11]. Da ausschließlich diese Literaturquelle frei verfügbar ist, werden die Werte trotz einer ausschließlichen experimentellen Prüfung bei trockener Konditionierung (ETD-Bedingung) für die Simulation verwendet. Die in Quelle [Mar11] angegebenen Werkstoffwerte für RTD-Bedingungen unterscheiden sich von denen in Tabelle 4.1 aufgeführten. Die Zahlenwerte der Ingenieurskonstanten sind geringer. Um dennoch einen korrekten Vergleich der RTD- und ETD-Bedingungen zu erhalten, werden ebenfalls Simulationen mit den in [Mar11] aufgeführten Werten bei RTD-Bedingungen durchgeführt.

Für die Herstellung der Couponproben werden Platten aus dem beschriebenen Prepreg gefertigt. Das Aushärten erfolgt in einem Autoklaven bei einer maximalen Temperatur von 180 °C und einem

Tabelle 4.1: Verwendete Werkstoffkennwerte für Prepreg *Hexcel 8552 IM-7* bei RTD-Bedingungen (Raumtemperatur und trockene Konditionierung). Diese Werte gelten für eine UD-Lage und wurden aus verschiedenen Quellen gemittelt [Wö14][NMS13][CMD07].

Parameter	Wert	Einheit
E_{11}	175084	MPa
E_{22}	9356	MPa
E_{33}	9356	MPa
ν_{12}	0,32	/
ν_{23}	0,36	/
ν_{31}	0,02	/
G_{12}	5450	MPa
G_{23}	3458	MPa
G_{31}	5450	MPa

Tabelle 4.2: Verwendete Werkstoffkennwerte für das Prepreg *Hexcel 8552 IM-7* bei ETD-Bedingungen (erhöhte Prüftemperatur und trockene Konditionierung) [Mar11]

Parameter	Wert	Einheit
E_{11}	163775	MPa
E_{22}	5581	MPa
E_{33}	5581	MPa
ν_{12}	0,393	/
ν_{23}	0,393	/
ν_{31}	0,02	/
G_{12}	2136	MPa
G_{23}	2003	MPa
G_{31}	2136	MPa

konstanten Druck von 7 bar. Der Aushärtezyklus hat eine Gesamtdauer von ca. 8 Stunden. Das Datenblatt des Prepreg-Herstellers mit dem genauen Autoklavzyklus befindet sich in Anhang C.

Im Rahmen der Arbeit werden zwei unterschiedliche quasi-isotrope Lagenaufbauten, im Folgenden als *QI1* und *QI3* bezeichnet, untersucht. Diese unterscheiden sich in der Stapelfolge, welche in Tabelle 4.4 dargestellt ist. Jedes Laminat ist aus je sechs 0°, sechs 90°, sechs -45° und sechs +45°-Lagen, d.h. insgesamt 24 Lagen, aufgebaut. Die Bezeichnung der Lamine mit *QI1* und *QI3* ergibt sich ursprünglich aus bereits am DLR durchgeführten Referenzversuchen. Für die zwei ausgewählten Lagenaufbauten waren daher sowohl numerische als auch umfangreiche experimentelle Daten aus bereits durchgeführten Zugversuchen vorhanden. Der Lagenaufbau *QI1* zeichnet sich außerdem durch doppelte 0°- und 90°-Lagen aus. Dies führt möglicherweise zur Verstärkung der sich durch eine variable Schäftung ergebenden mechanischen Effekte, die in der vorliegenden Arbeit untersucht werden sollen. Jede einzelne Lage hat nach dem Aushärten laut Datenblatt eine Dicke von 0,131 mm. Es wird jedoch in der Simulation von einer realen Dicke von $t_L = 0,125$ mm ausgegangen. Die Gesamtdicke einer Probe beträgt folglich $t = 3$ mm.

Vor Beginn dieser Arbeit wurden Zugversuche an Proben aus *Hexcel 8552 IM-7* zur Ermittlung der Werkstoffkennwerte für das reine Laminat durchgeführt. Für die in dieser Arbeit verwendeten Laminataufbauten *QI1* und *QI3* zeigt Tabelle 4.5 die Ergebnisse der reinen Laminat-Zugversuche. Es wurden Proben mit Schäftung je drei Versuche pro Laminattyp durchgeführt. Aus den Versuchen geht hervor, dass Laminataufbau *QI3* eine um 5 % höhere Versagenslast F_{max} aufweist.

Tabelle 4.3: Übersicht über die verwendeten Werkstoffkennwerte für das Prepreg *Hexcel 8552 IM-7* bei RTD-Bedingung zum Vergleich für die Rechnungen mit erhöhter Temperatur (ETD-Umgebung). Die Werte sind der Quelle [Mar11] entnommen.

Parameter	Wert	Einheit
E_{11}	161984	MPa
E_{22}	8957	MPa
E_{33}	8957	MPa
ν_{12}	0,316	/
ν_{23}	0,316	/
ν_{31}	0,02	/
G_{12}	4685	MPa
G_{23}	3403	MPa
G_{31}	4685	MPa

Tabelle 4.4: Übersicht über die Stapelfolge der verwendeten Laminataufbauten QI1 und QI3

Bezeichnung	Lagenaufbau
QI1	$[45, -45, 0, 0, 45, -45, 90, 90, 45, 0, -45, 90]_S$
QI3	$[45, 0, -45, 90, 45, 0, -45, 90, 45, 0, -45, 90]_S$

4.2.2 Klebstoff

Für die Verklebung der Schäftung wird der Epoxidharz-Filmklebstoff *HYSOL EA9695 NW* verwendet. Dieser ist besonders für die Reparatur von FKV-Bauteilen geeignet, da eine Aushärtung bei niedrigen Temperaturen und die Verklebung von bereits ausgehärteten (pre-cured) Laminaten möglich ist. Der Klebstoff ist in fester Filmform vorhanden und kann leicht und individuell auf die benötigte Klebfläche zugeschnitten werden. Ein Zerfließen des Klebstoffs durch den aufgetragenen Druck während dem Fertigungsprozess wird durch ein Vlies verhindert¹. Die verwendeten Klebstoffdaten stammen aus [FAA02], einem von der Federal Aviation Administration (FAA) veröffentlichtem Dokument mit Werkstoffkennwerten für verschiedene Strukturklebstoffe. Dort sind sowohl Elastizitäts- und Schubmoduln, sowie Schubspannungs-Scherungs-Diagramme veröffentlicht. Für RTD- und ETD-Bedingungen sind jeweils zwei Schubspannungs-Scherungs-Verläufe vorhanden. Als mittlere Klebschichtdicke sind 0,2794 mm (0,011 inch) angegeben. Die Temperatur der in der Quelle angegebene ETD-Umgebung beträgt 82,2 °C (180 °F). Da eine alternative Literaturquelle nicht zur Verfügung stand, werden die Werte für die Simulation bei ETD-Bedingungen verwendet, obwohl die Prüftemperatur in der experimentellen Überprüfung 100 °C betragen wird.

¹ Dafür steht das Kürzel NW (Non-woven fabric) hinter der Klebstoff Bezeichnung.

Tabelle 4.5: Ergebnisse der Zugversuche an Proben ohne Reparatur für die Laminataufbauten QI1 und QI3

Parameter	Formelzeichen	Einheit	QI1	QI3
Versagenslast	F_{max}	kN	64,94	68,23
Bruchdehnung	ε_{ult}	%	1,38	1,38
Versagensspannung	σ_M	MPa	835,17	879,9
E-Modul	E	GPa	62,96	63,13

Für die numerische Simulation (siehe Kapitel 5) ist die Eingabe exakter Wertepaare der Spannungsverläufe erforderlich. Daher wird durch polynomische Interpolation aus beiden Kurven jeweils eine Funktion erstellt. Die Funktionsstellen und -werte werden anschließend gemittelt und darauf basierend ein gemittelter Schubspannungs-Scherungs-Verlauf für RTD- und ETD-Bedingung erstellt. Die Schubspannung τ_{xy} wird mithilfe der Formel

$$\sigma_v = \sqrt{3} \cdot \tau_{xy} \quad (4.1)$$

in die Vergleichsspannung nach VON-MISES σ_v umgerechnet. Die VON-MISES-Dehnung ε_v errechnet sich ausgehend von der Scherung γ_{xy} zu

$$\varepsilon_v = \frac{\gamma_{xy}}{\sqrt{3}} \quad (4.2)$$

Normalspannungen werden in diesem Werkstoffmodell nicht berücksichtigt. Einerseits sind keine Werkstoffkennwerte dazu vorhanden. Andererseits wird die Klebschicht ohnehin hauptsächlich auf Schub beansprucht. Abbildung 4.4 zeigt die gemittelten VON-MISES-Spannungs-Dehnungskurven bei RTD- und ETD-Umgebung. In Tabelle 4.6 und Tabelle 4.7 sind mit dem Elastizitätsmodul E_K , der Querkontraktionszahl ν_K und der maximalen VON-MISES-Dehnung ε_K die isotropen Werte des Klebstoffs angegeben. Die isotropen Daten und VON-MISES-Spannungen stehen miteinander im Zusammenhang, da der Elastizitätsmodul der isotropen Parameter mit dem Anfangs Elastizitätsmodul der Spannungs-Dehnungskurve übereinstimmt. Beide Datensätze sind für die numerische Simulation notwendig und werden von *MSC Nastran* als Solver verlangt (siehe Abschnitt 5.1.1) [Wö14].

Das zweistündige Aushärten des Klebstoffs erfolgt in einem Ofen oder Autoklav bei 130 °C und einem absoluten Druck von 4 bar. Ein Datenblatt ist in Anhang C zu finden.

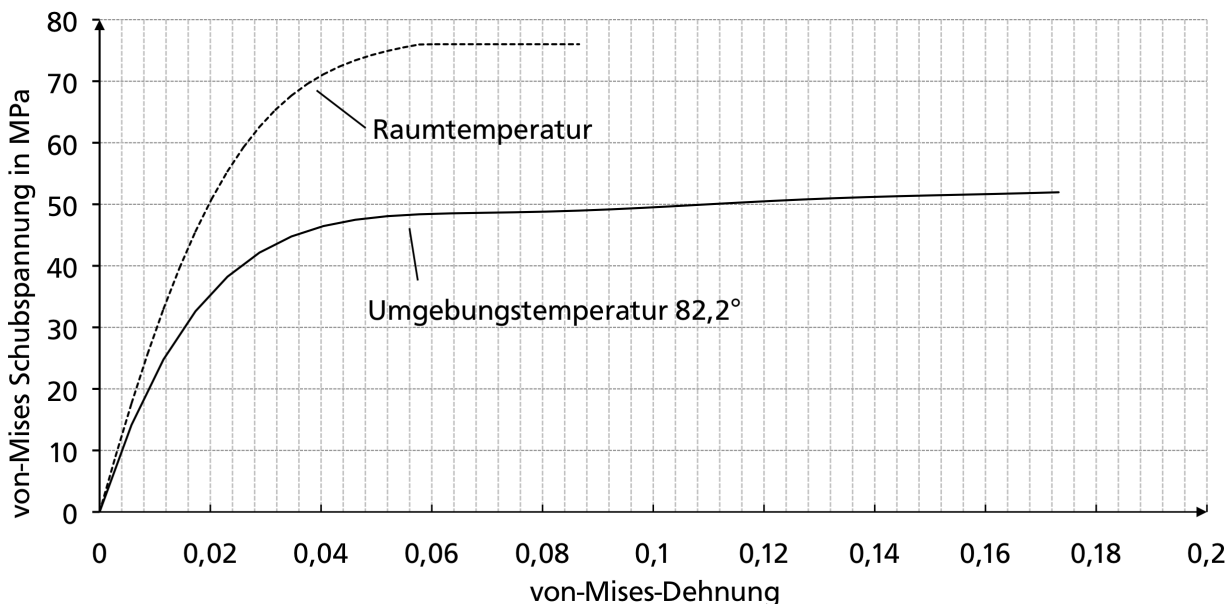


Abbildung 4.4: Aus den Daten des FAA-Dokuments [FAA02] gemitteltes Schubspannungs-Dehnungs-Diagramm für den Klebstoff HYSOL EA9695 NW bei RTD- und ETD-Bedingungen

Tabelle 4.6: Übersicht über die isotropen Materialeigenschaften des Klebstoffs *HYSOL EA9695 NW* bei RTD-Bedingungen [FAA02]

Parameter	Wert	Einheit
E-Modul E_K	3143	MPa
Querkontraktionszahl ν_K	0,3	/
Maximale VON-MISES-Dehnung ε_K	0,0866	/

Tabelle 4.7: Übersicht über die isotropen Materialeigenschaften des Klebstoffs *HYSOL EA9695 NW* bei ETD-Bedingungen [FAA02]

Parameter	Wert	Einheit
E-Modul E_K	2452,65	MPa
Querkontraktionszahl ν_K	0,3	/
Maximale VON-MISES-Dehnung ε_K	0,1732	/

4.2.3 Referenzversuche mit einer 1:20-Schäftung

Neben den Zugversuchen an reinen Laminatproben wurden Festigkeitswerte für Proben mit einer konstanten 1:20-Schäftung ermittelt. Ein solches Verhältnis ist bei herkömmlichen Reparaturen üblich [WG07] und wird daher als Referenzfall für die variablen Schäftungen verwendet. Die Klebschichtdicke t_K betrug 0,05 mm und lag damit am unteren Rand des idealen Klebschichtdickenbereichs. Pro Lagenaufbau wurden drei Zugversuche durchgeführt. In Tabelle 4.8 werden die Ergebnisse dieser Schäftungsproben vorgestellt. Bei den Schäftungen sinkt die Versagenslast F_{max} im Gegensatz zum reinen Laminat um 47,8 % bei QI1 bzw. 39,4 % bei QI3.

Tabelle 4.8: Ergebnisse der Zugversuche an Proben mit einer Schäftung im Verhältnis 1:20 für Laminataufbauten QI1 und QI3

Parameter	Formelzeichen	Einheit	QI1	QI3
Versagenslast	F_{max}	kN	33,90	41,32
Bruchdehnung	ε_{ult}	%	0,74	0,86
Versagensspannung	σ_M	MPa	435,89	532,82
E-Modul	E	GPa	58,97	60,97

4.3 Variable Schäftungen

In Abschnitt 3.4 wurde das Potential einer lagenweisen Anpassung des Schäftungswinkels aufgezeigt. In den folgenden Abschnitten wird daher auf vereinfachte Weise ein idealer Schäftungswinkel durch Umstellung der in Abschnitt 3.3 aufgezeigten Beziehungen ermittelt. Anschließend wird auf die besondere geometrische Problematik bei einer winkel-variablen Schäftung und die Definition einer variablen Schäftungsgeometrie eingegangen.

4.3.1 Abschätzung des idealen Schäftungswinkels

Mithilfe der in Abschnitt 3.3 durchgeführten, einfachen Herleitung zur Spannungsberechnung in einer Schäftung mit isotropen Fügepartnern kann eine einfache Beziehung zur Ermittlung einer idealen Schäftungswinkelgeometrie in einer Klebung mit quasi-isotropen Fügepartnern erstellt werden. Es wird dabei schichtenweise vorgegangen, d.h für jede Lage des Laminats ein separater

Schäftungswinkel ermittelt. Dies ist notwendig, da sich die Lagen aus mechanischer Sicht aufgrund der Faserrichtung bei Belastung in globaler x-Richtung unterscheiden. Die zuvor hergeleitete Formel 3.5 wird nach dem Schäftungswinkel θ umgestellt. Die nun im Nenner des Bruchs stehende Normalspannung σ_x wird mit dem Elastizitätsmodul E und der Dehnung ε zu $\sigma = E \cdot \varepsilon$ ersetzt. Es ergibt sich:

$$\theta = \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{2 \cdot \tau_K}{E \cdot \varepsilon} \right) \quad (4.3)$$

Da jener Schäftungswinkel gesucht wird, der eine maximale Belastung der Klebschicht bis zum Versagen erlaubt, ist für die Schubspannung τ_K die maximale Schubspannung des Klebstoffs bei RTD-Bedingungen einzusetzen. Dieser Wert wird dem als Grundlage für die Werkstoffparameter des Klebstoffs *HYSOL EA 9695* verwendeten Dokument [FAA02] entnommen und beträgt $\tau_K = 44$ MPa.

Die Dehnung des Laminats wird bei Zugbelastung in allen Lagen als gleich angenommen. Der exakte Wert wird den in Abschnitt 4.2.3 angegebenen Versuchsergebnissen für Zugproben ohne Reparatur entnommen und beträgt $\varepsilon_{ult} = 0,0138$. Dies entspricht der Bruchdehnung für Lagenaufbau QI1 und QI3. Da das Laminat vier verschiedene Faserorientierungen aufweist, unterscheiden sich die entsprechenden Elastizitätsmoduln in globaler x-Richtung. Als Grundlage zur Bestimmung der reduzierten Steifigkeiten dienen die in Abschnitt 4.2 vorgestellten Werkstoffkennwerten. Dazu wird mittels Klassischer Laminat Theorie (CLT) die Steifigkeitsmatrix für eine UD-Lage berechnet. Die Steifigkeiten der $\pm 45^\circ$ -Lagen müssen zusätzlich durch eine Transformation ermittelt werden. Eine genaue Herleitung der reduzierten Lagensteifigkeiten ist Anhang A zu entnehmen. Werden die drei Werte in die Formel eingesetzt, ergeben sich für die einzelnen Lagen die in Tabelle 4.9 ideal-abgeschätzten Schäftungswinkel.

Tabelle 4.9: Übersicht über die angenommenen Lagensteifigkeiten und die sich daraus ergebende Schäftungswinkelabschätzung. Die reduzierten Lagensteifigkeiten wurden auf die zweite Stelle vor dem Komma gerundet; die Winkel auf die erste Dezimalstelle.

Lagenwinkel	Transformierte Lagensteifigkeit Q	Schäftungswinkel θ
0°	176000 MPa	1°
90°	9400 MPa	21,4°
$\pm 45^\circ$	53300 MPa	3,4°

Die Lagensteifigkeiten werden auf die zweite Stelle vor dem Komma gerundet, die Winkel auf die erste Dezimalstelle. Diese Vereinfachung ist bei den gemachten Annahmen ausreichend. Die errechneten Winkel geben den größtmöglichen Wert an. Flachere Winkel sind mechanisch günstiger, erhöhen jedoch die Reparaturlänge.

4.3.2 Geometrie der variablen Schäftung

Wird die sich aufgrund der ermittelten Winkel ergebende Klebschichtgeometrie der Einzellage auf das gesamte Laminat aufgetragen, so ergibt sich die in Abbildung 4.5 dargestellte Seitenansicht der gesamten Klebschichtgeometrie. Dieser Verlauf ist für beide Laminattypen abgebildet. Die y-Achse beschreibt die Probenhöhe, die x-Achse die Länge der Reparatur, d.h. den Bereich in dem sich beide Fügepartner überlappen. Die Dicke der Klebschicht wird in dieser ersten Übersicht zunächst vernachlässigt. Die Geometrie der Schäftung von Laminat QI3 weist aufgrund des Lagenaufbaus im Gegensatz zu QI1 häufigere Winkeländerungen auf. Erfolgt die Winkeldefinition streng nach Formel, ergibt sich für beide Lamine eine Reparaturlänge von $L \approx 70$ mm bei einer idealen Probendicke

von $t = 3$ mm. Als Vergleich ist die Klebschichtgeometrie für die konstante 1:20-Schäftung mit einem Schäftungswinkel von $\theta = 2,8624^\circ$ dargestellt.

Mithilfe der in Abschnitt 3.3 hergeleiteten Formel kann durch Einsetzen der entsprechenden Winkel der in Abbildung 4.6 dargestellte Schubspannungsverlauf entlang der Klebschicht abgeschätzt werden. Auf der x-Achse ist die normierte Klebschichtlänge angegeben. Als Belastung wird eine statische Zugkraft von 25 kN angenommen. Das Potential der variablen Schäftung ist anhand dieser, mit einfachen mechanischen Beziehungen hergeleiteten, Spannungsverläufe gut zu erkennen. In den 0° -Lagen kann die Schubspannung um ca. 63 % gesenkt werden. Da die angenommenen Schäftungswinkel in den $\pm 45^\circ$ - ($3,4^\circ$) und 90° -Lagen ($21,4^\circ$) größer sind als der globale Schäftungswinkel in der 1:20-Schäftung ($2,8624^\circ$) steigt in der variablen Klebschicht die Schubspannung. Damit ergibt sich ein annähernd konstanter Schubspannungsverlauf ohne versagensinitiiierende Spannungsspitzen an den 0° -Lagen. Die mathematische Rundung der Werte bei der Abschätzung der Schäftungswinkel sind der Grund für die geringfügig erhöhte Spannung im Bereich der 90° -Lagen.

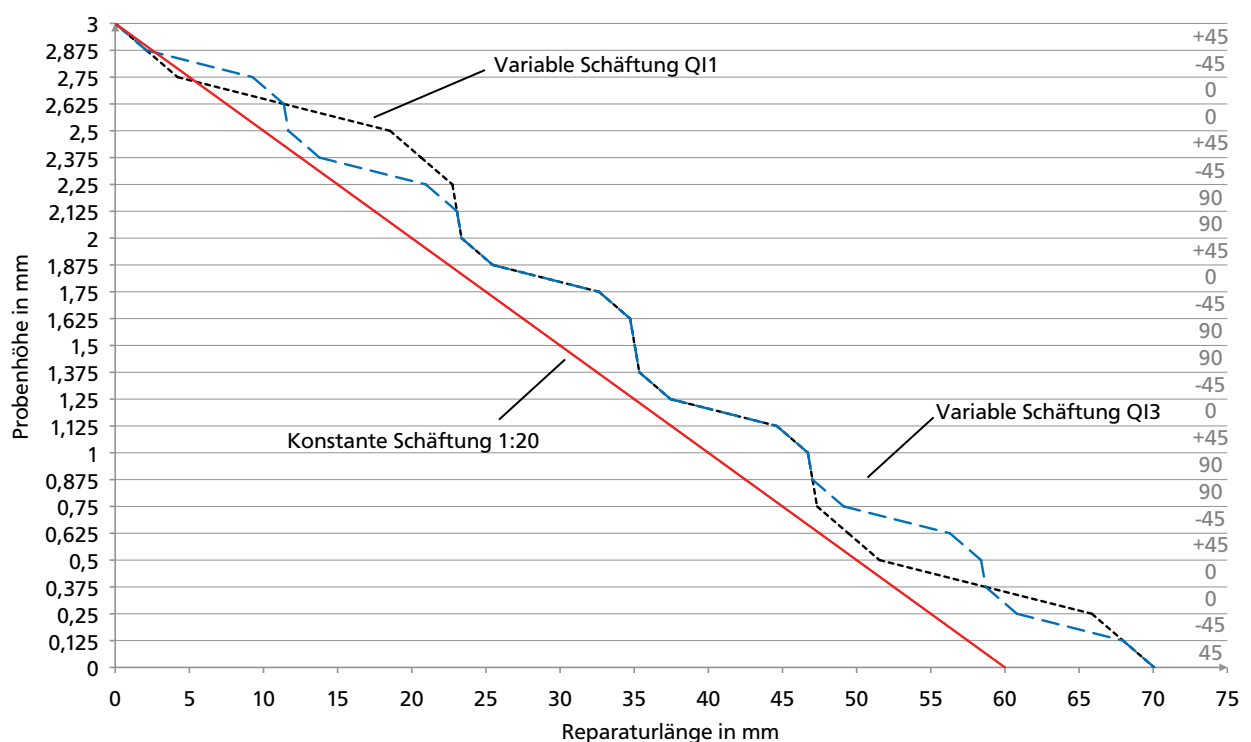


Abbildung 4.5: Die sich aus der Formel ergebenden Schäftungsverläufe für Lagenaufbau Q11 und Q13. Die Reparaturlänge erhöht sich gegenüber der 1:20-Schäftung auf 70 mm.

Wie in Abbildung 4.7 (a) beispielhaft dargestellt ist in einer konstanten Schäftung die Klebschichtdicke t_K aufgrund der Geometrie konstant². Die gleichmäßige Klebschicht ist für die Festigkeit einer Strukturklebung essentiell, da zusätzliche versagensinitiiierende Spannungsspitzen aufgrund verschiedener Klebschichtdicken verhindert werden. Die Klebschichtdicke variiert jedoch, wenn in einer variablen Schäftung die Winkeländerung an der Grenzschicht zwischen den Lagen mit unterschiedlicher Winkelerorientierung erfolgt. Diese geometrische Beziehung ist in Abbildung 4.7 (b) dargestellt. Es würde sich in jeder Lage eine unterschiedliche Klebschichtdicke t_K einstellen. Dies hat zur Folge, dass sich Schubspannungsänderungen aufgrund der Winkeländerung sich mit denen der variablen Klebschichtdicke überlagern. Außerdem ist bei der Fertigung der Couponproben davon auszugehen, dass die Benetzung der Fügepartner mit Klebstoff im Bereich der 90° -Lagen

² Der Lagenaufbau entspricht zur Verdeutlichung des Effekts nicht der in dieser Arbeit verwendeten Reihenfolge der Lagenorientierung.

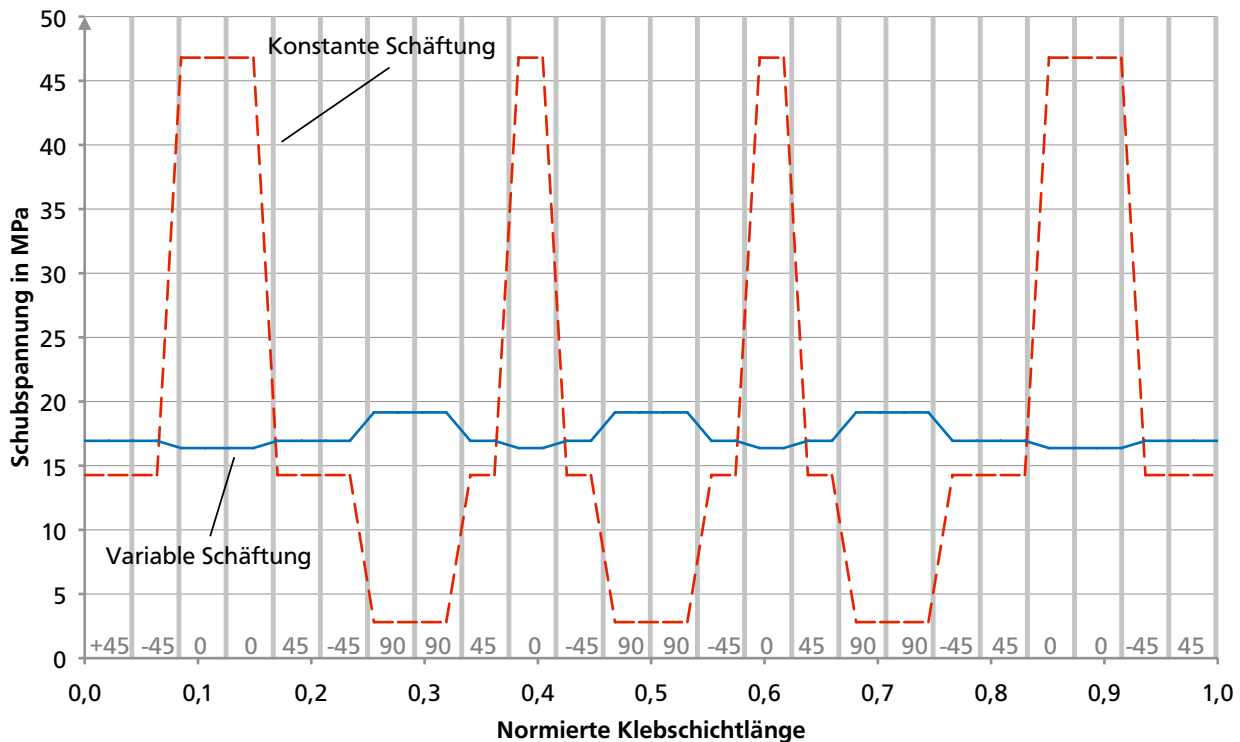
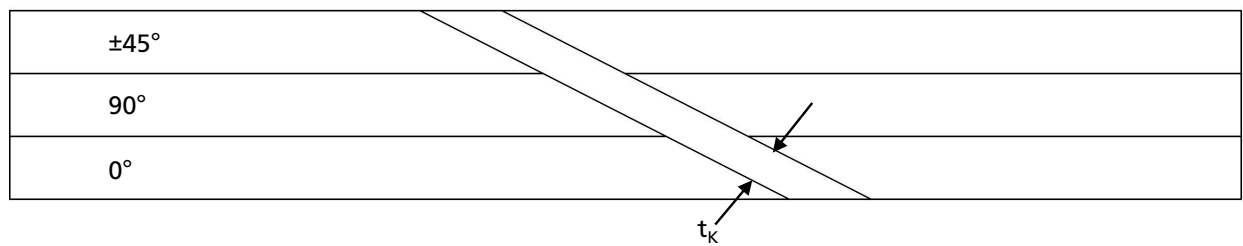


Abbildung 4.6: Vergleich der sich in der Klebschicht ergebenden, analytisch ermittelten, Schubspannung bei einer konstanten und einer variablen Schäftung für Lagenaufbau Q11

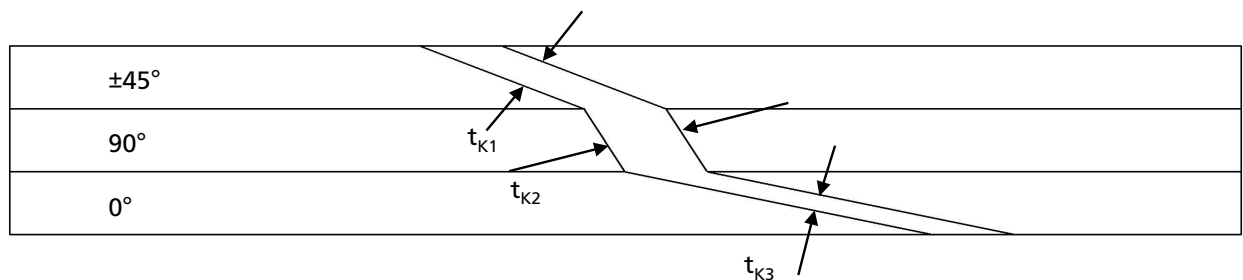
unzureichend ist. Aus diesem Grund muss die Position der Winkeländerung, d.h. der Knickpunkt der Grenzschicht von Laminat und Klebstoff, zur Wahrung einer gleichmäßigen Klebschichtdicke aus der Grenzschicht der Einzellagen heraus verschoben werden.

Diese Verschiebung kann auf zwei Arten erfolgen. Eine Möglichkeit ist es, die Grenzschicht von Laminat und Klebstoff auf der Seite eines der Fügepartners als fixiert zu betrachten, sodass die Knickpunkte weiterhin in der Lagengrenzschicht liegen. Normal zu dieser wird im Abstand der geforderten Klebschichtdicke die zweite Grenzschicht von Klebstoff und Laminat definiert. Diese Geometrie hat den Nachteil, dass die Knickpunkte weit in die benachbarten Lagen hineinragen und dadurch größere Bereiche einer Seite der Klebschicht einen inkorrekten Schäftungswinkel aufweisen. Abbildung 4.7 (c) zeigt die bei einer solchen Verschiebung entstehende Geometrie mit dem beispielhaften Abstand d_1 des Knickpunktes vom Lagenübergang. Eine solche Auslegung ruft Schubspannungsspitzen hervor, vor allem wenn ein größerer Winkel in einer nicht dafür vorgesehenen Lage liegt³. Außerdem besteht an den Randlagen die Gefahr des Herausbrechens einzelner Fasern bei der Fertigung, da dort möglicherweise nach der letzten Winkeländerung wenig Restlaminat vorhanden ist. Die andere Möglichkeit für eine Verschiebung besteht darin, zunächst die Mittellinie der variablen Klebschicht so zu definieren, dass die Knickpunkte wie zuvor in den Lagenübergängen liegen. Die Grenzschichten von Laminat und Klebstoff werden definiert, indem diese Mittellinie jeweils normal um die halbe geforderte Klebschichtdicke verschoben wird. Die entstehende Klebschichtgeometrie ist in Abbildung 4.7 (d) dargestellt. Alle Knickpunkte (außer in der Mitte des Gesamtlaminats) liegen außerhalb des Lagenübergangs. Dennoch ist der Anteil entlang der Klebschicht welcher einen inkorrekten Schäftungswinkel aufweist, pro Fügepartner geringer, da der Abstand d_2 kleiner als d_1 ist. Damit sind auch die zu erwartenden Schubspannungsspitzen niedriger.

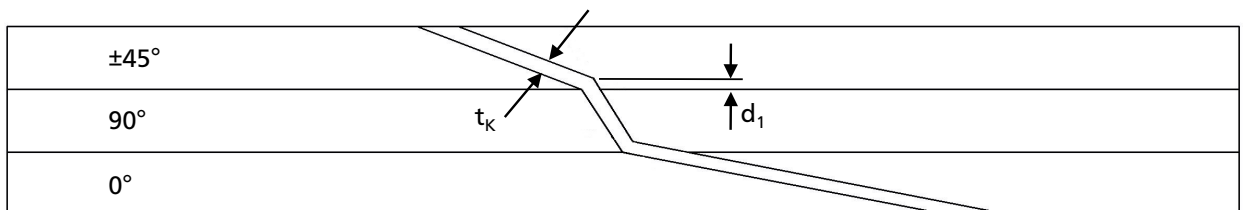
³ Dies ist beispielsweise der Fall in einer 90°-Lage mit einem Schäftungswinkel, der dadurch in einer benachbarten $\pm 45^\circ$ -Lage liegt.



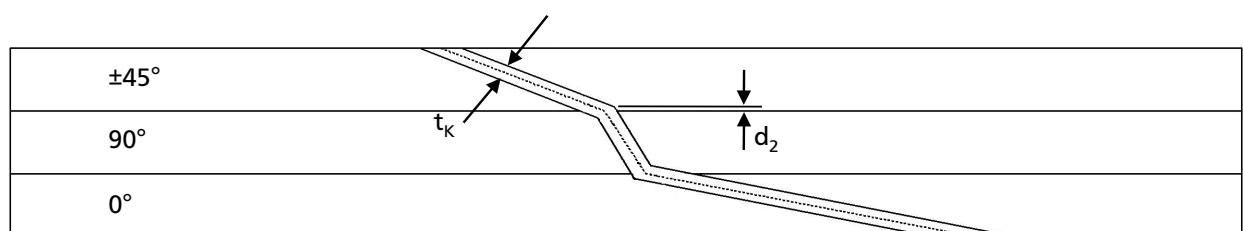
(a) Konstanter Schäftungswinkel



(b) Variabler Schäftungswinkel mit unterschiedlicher Klebschichtdicke



(c) Variabler Schäftungswinkel mit konstanter Klebschichtdicke durch Verschiebung der Knickpunkte an einem der Fügepartner



(d) Variabler Schäftungswinkel mit konstanter Klebschichtdicke durch Verschiebung der Knickpunkte an beiden Fügepartnern

Abbildung 4.7: Geometrische Änderung der Klebschichtdicke: (a) zeigt eine Schäftung mit konstanter Klebschichtdicke t_k , (b) eine variable Schäftung mit variabler Klebschichtdicke, da sich die Knickpunkte weiterhin auf der Grenze zweier Lagen befinden und (c) und (d) variable Schäftungen mit konstanter Klebschichtdicke, da sich die Knickpunkte innerhalb der Nachbarlagen befinden.

In dieser Arbeit wird grundsätzlich die in (d) dargestellte Geometrie verwendet, da anderweitig eine Unterscheidung der Auswirkungen auf die Festigkeit, hervorgerufen durch die Variation der Schäftungswinkel und der Änderung der Klebschichtdicke, nicht unterscheidbar sind. Zur Überprüfung des Einflusses einer variierenden Klebschichtdicke werden jedoch Vergleichssimulationen und Versuche mit einer auf Geometrie (b) basierenden variablen Schäftung durchgeführt. Die Dicke der Klebschicht soll, aufgrund der in Abschnitt 2.2.2 vorgestellten Einflüsse, $t_K = 0,13$ mm betragen. Dies entspricht in etwa dem Maximum der Kurve in Abbildung 2.4.

Wie bereits zuvor erwähnt, ergeben sich durch lagenvariable Schäftungswinkel neben einer Steigerung der Festigkeit aufgrund der Geometrie einen weiteren Vorteil. Die Winkeländerung erhöht die Klebspaltlänge und ermöglicht damit eine leichte Vergrößerung der Klebfläche. Dieser Effekt wirkt sich zusätzlich festigkeitssteigernd aus.

Das im Rahmen dieser Arbeit angestrebte Prüfprogramm soll den numerischen und experimentellen Vergleich mehrerer variabler Schäftungsgeometrien (d.h. Kombination verschiedenster Lagen-schäftungswinkel) mit der in Abbildung 4.5 gezeigten Standardschäftung (Verhältnis von 1:20) ermöglichen. Zur besseren Vergleichbarkeit soll die Reparaturlänge von 60 mm als Richtwert dienen und möglichst konstant bleiben. Des Weiteren werden Schäftungsgeometrien untersucht, bei denen die Reparaturlänge auf ein Mindestmaß reduziert wird. Als Vergleich dient die Verbindungsfestigkeit der 1:20-Schäftung, um das Potential der Schäftung bezüglich der Reparaturlänge zu analysieren. Aufgrund der sich ergebenden komplexen Klebschichtgeometrien ist die Spannungs- und Festigkeitsanalyse mithilfe einer FE-Simulation die einzige Möglichkeit für eine korrekte Abbildung der Realität. Einfache analytische Methoden sind dazu nicht mehr ausreichend. Die experimentelle Überprüfung dient neben der Verifizierung der FEM vor allem der Untersuchung von Fertigungseinflüssen und der Übertragbarkeit der Modelle auf reale Reparaturen.

5 Numerische Untersuchung

Die numerische Untersuchung dient einer ersten qualitativen Analyse der winkelvariablen Schäftung. Ziel ist die Identifizierung relevanter Parameter für die Erstellung eines Probenprogramms. Zu Beginn dieses Kapitels wird das numerische FE-Modell sowie das Pre- und Postprocessing vorgestellt. Anschließend wird auf den Einfluss der Modellvernetzung und die dazu durchgeführte Netzanalyse eingegangen. Den Abschluss bildet die Beschreibung der einzelnen Simulationsschritte und die Vorstellung der Simulationsergebnisse.

5.1 Dreidimensionales FE-Modell

Das im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendete, parametrische FE-Modell basiert auf einem bestehenden Simulationstool zur Auslegung konstanter Schäftungen [Wö14]. Ziel dieser durch WÖLPER erstellten Simulationen ist die Berechnung und Analyse geschäfteter Couponproben. Durch Änderung der Parameter im Preprocessing ist eine Übertragung auf geschäftete Klebverbindungen mit lagenvariablen Schäftungswinkeln möglich. Zur Generierung des FE-Modells wird das Programm *MSC Patran 2012.2* verwendet, als Solver dient *MSC Nastran 2013.1*.

5.1.1 Modell

Das ursprüngliche FE-Modell dient der Modellierung und Analyse einer vollständigen Couponprobe. Zur Verringerung des Rechenaufwands wird der virtuelle Probekörper, wie in Abbildung 5.1 dargestellt, in drei Bereiche unterteilt.

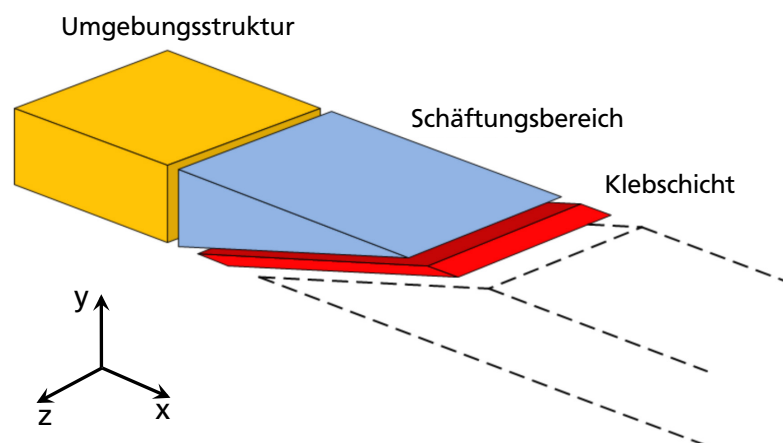


Abbildung 5.1: Übersicht über das numerische Modell mit der Einteilung in die drei Bereiche Umgebungsstruktur, Schäftungsbereich und Klebschicht [Wö14]

Die Umgebungsstruktur liegt außerhalb des Schäftungsbereichs und ist für die eigentliche mechanische Betrachtung von untergeordneter Rolle. Es werden quaderförmige, 8-knotige HEX-Elemente des Typs *Layer Solid Element* verwendet, denen ein Lagenaufbau als Materialeigenschaft zugewiesen wird. Das Laminat kann daher über seine Dicke mit einem Element modelliert werden.

Der Schäftungsbereich und die Klebschicht hingegen müssen detaillierter modelliert werden, da in diesen Bereichen die zu untersuchenden Kraftflüsse und Spannungen ausgewertet werden. Im Schäftungsbereich ist daher jede Lage einzeln und durch mindestens ein Volumenelement aufgebaut. Für die Auswertung von Versagenskriterien, die maßgeblich im Fokus der Untersuchungen von konstanten Schäftungen standen, müssen auch die quaderförmigen HEX-Elemente dieses Bereichs *Layer Solid Elements* sein. In *MSC Patran* kann nur dieser Elementtyp Versagenskriterien ausgeben. Dabei wird jedem Element zunächst eine 0°-Lage mit UD-Eigenschaften zugewiesen und anschließend über ein Referenzkoordinatensystem in die entsprechende Lagenorientierung verschoben. Aufgrund der kleinen Schäftungswinkel und der feinen Modellierung ist die Vernetzung nicht ausschließlich mit HEX-Elementen möglich. Es müssen zusätzlich 4-knotige TETRA-Elemente (Tetraeder) für die Vernetzung im Bereich des Übergangs von Laminat zu Klebschicht verwendet werden. Diese können keine *Layer Solid Elements*-Funktionen annehmen, weshalb diesen Elementen zusätzliche Elementeigenschaften zugewiesen werden. Eine Auswertung von Versagenskriterien ist jedoch nicht möglich. Der Klebschichtbereich muss ebenfalls detailliert modelliert werden, da auf dieser Struktur der Fokus der Untersuchung liegt. Die Vernetzung erfolgt mit mindestens zwei HEX-Elementen über der Klebschichtdicke.

Die drei Bereiche werden über Kontaktbedingungen miteinander verbunden. Eine direkte Verbindung der Knoten ist aufgrund der unterschiedlichen Netzfeinheiten bei der Anbindung der Umgebungsstruktur an den Schäftungsbereich nicht möglich und führt andernfalls zu einer starken Verzerrung der Elemente.

Die geometrischen Abmaße des FE-Modells unterscheiden sich geringfügig von der in der Norm *prEN 6066* beschriebenen Geometrie (siehe Abschnitt 4.1). Die erforderlichen Maße sind dort mit 280 mm x 25,4 mm angegeben. Die freie Weglänge zwischen der Probe und den Spannvorrichtungen der Zug-Prüfmaschine beträgt 160–180 mm. Der Probekörper im FE-Modell weist eine kürzere Länge von 110 mm auf, wobei je nach Geometrie mindestens 70 mm auf den eigentlichen Schäftungsbereich entfallen. Diese Länge ist ausreichend um das Spannungsniveau innerhalb der Klebschicht und des klebschichtnahen Laminatbereichs zu modellieren [Wö14]. Die Breite der Probe wird im FE-Modell auf 12,5 mm reduziert. Beide Maßnahmen verringern die erforderliche Rechenzeit. Die in [Wö14] durchgeführten Voruntersuchungen zeigen, dass die getroffenen Vereinfachungen keinen Einfluss auf die Rechenergebnisse haben. Fertigungsbedingte Abweichungen werden in der modifizierten Schäftungsberechnung mit lagenvariablen Winkeln nicht berücksichtigt.

Die den Elemente zugewiesenen Werkstoffparameter wurden bereits in Abschnitt 4.2 vorgestellt. Da für den Klebstoff ein elastisch-plastisches Werkstoffverhalten angenommen wird, müssen zum einen die isotropen Eigenschaften, zum anderen die Werte der *VON-MISES*-Spannungs-Dehnungskurve vorgegeben werden. Diese Daten werden von *MSC Nastran* als Eingabeparameter verlangt.

Das bereits existierende Modell berücksichtigt zwei etablierte Versagenskriterien. Für das Laminat wird das *PUCK*-Kriterium angenommen. Dieses kann direkt für die 3D-Elemente in *MSC Nastran* implementiert werden und findet in der Luftfahrtindustrie eine breite Verwendung. Bei den Klebstoffelementen wird die *VON-MISES*-Dehnung mit einem Maximalwert verglichen. Dieses Versagenskriterium berücksichtigt sowohl Normal- als auch Schubdehnungen und damit die Hauptbeanspruchungen der Klebschicht.

5.1.2 Pre- und Postprocessing

Die Generierung des FE-Modells erfolgt in zwei aufeinander folgenden *Preprocessing*-Schritten. Dabei wird ein *Excel*-Preprocessor und ein in *MSC Patran* implementiertes PCL-Tool verwendet [Wö12]. Beides sind Eigenentwicklungen des *Instituts für Faserverbundleichtbau und Adaptronik*. Mithilfe des *Excel*-Preprocessor wird eine .csv-Datei erstellt und durch das PCL-Tool in *MSC Patran*

eingelassen. Aufgrund der zuvor eingegebenen Parameter wird die Probengeometrie erstellt. Wie in Abbildung 5.2 dargestellt, ist die Eingabemaske in drei Bereiche unterteilt:

1. Der Bereich 1 ist in vier Felder mit den Bezeichnungen *Global specimen geo.* (Geometrie), *Mesh* (Vernetzung), *Bond-line geometry* (Klebschichtgeometrie) und *Bond-line, Load and BC's* (Klebschicht, Last und Randbedingungen) gegliedert. Im Feld *Global specimen geo.* werden die geometrische Abmessungen der Probe (Länge und Breite) und die Klebschichtdicke des gewünschten Modells definiert. Die Anzahl der Lagen und der globale Schäftungswinkel ergeben sich aus den anderen Bereichen.

Create CSV File

Name of Analyses: Q11_var12

Global specimen geo.	
Length	110 [mm]
Width	12,5 [mm]
Global scarf angle	8,4 [°]
Thickness adhesive	0,13 [mm]
Number of plies	24 [-]

Mesh	
Number of Elm along t ply	3 [-]
Numb Elm along half adhesive t	2 [-]
Adhesive Elm length at bond line	0,125 [-]
Elm sweep length adhesive	1,000 [-]
Elm sweep length fine CFRP mesh	1,000 [-]
Elm sweep length rough CFRP mesh	3,000 [-]

Bond-line geometry	
Geometry referenced to center line	2D 2D Equiv* 3D 3D Equiv*
Both offsets in normal directions	x x 1 x
Both offsets in length directions	x x 2 x
Offset: Patch = normal / Stock = length	x x 3 x
Offset: Patch = length / Stock = normal	x x 4 x
Constant scarf angle	5 6 5 6

Bond- line, Load and BC's

Tension load 65000 [N]

Symmetric (half part) FALSE [-]

Bond-line geometry 1 [-]

Laminate Data

Data for stock (data for basic part)

Ply Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Stacking sequence [full]	45	-45	0	0	45	-45	90	90	45	0	-45	90	90	-45	0	45	90	90	-45	45	0	0	-45	45								
Ply thickness [mm]	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	
Scarf-angle [°]	10	7,4	1	1	3,5	3,5	22	22	3,5	1,4	3,5	22	22	3,5	1,4	3,5	22	22	3,5	3,5	1	1	7,4	10								
Material ID	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	

Data for patch

Ply Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Stacking sequence [full]	45	-45	0	0	45	-45	90	90	45	0	-45	90	90	-45	0	45	90	90	-45	45	0	0	-45	45								
Ply thickness [mm]	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	
Scarf-angle [°]	10	7,4	1	1	3,5	3,5	22	22	3,5	1,4	3,5	22	22	3,5	1,4	3,5	22	22	3,5	3,5	1	1	7,4	10								
Material ID	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	

Material Data

Laminate material data

Material ID Laminate	2	3	4	5	6	7	8
Material name	IM7_977-3	IM7_8552					
E11 [Mpa]	164100	175084					
E22 [Mpa]	9860	9356					
E33 [Mpa]	9860	9356					
v12 [-]	0,33	0,32					
v23 [-]	0,34	0,36					
v31 [-]	0,02	0,02					
G12 [Mpa]	4950	5450					
G23 [Mpa]	2944	3458					
G31 [Mpa]	4950	5450					

Adhesive material data

Material ID Adhesive	1	2	3	4	5	6	7	8
Material name	EA9695							
E [Mpa]	3142,7							
v12 [-]	0,3							
G [Mpa]	1268,73							

Bereich 1
Bereich 2
Bereich 3

Abbildung 5.2: Benutzeroberfläche des *Excel*-Tools mit den Eingabefeldern für die erforderlichen Simulationsparameter

Im Feld *Mesh* werden sechs Parameter für die Vernetzung des Probekörpers eingegeben. Über die ersten beiden Positionen wird die Elementanzahl über der Dicke einer Laminatlage und der halben Klebschichtdicke definiert (y-Richtung). Dabei ist die minimale Anzahl an Klebschichtelementen zwei. In einem weiteren Feld wird die Länge (in mm) der Klebschichtelemente in Längsrichtung (x-Richtung) vorgegeben. Die Vernetzung der Probenbreite (z-Richtung) erfolgt über drei weitere Felder für die Bereiche Klebschicht, Schäftungsbereich und Umgebungsbereich (Eingabe ebenfalls in mm).

Im dritten Feld mit der Bezeichnung *Bond-line geometry* werden verschiedene Klebschichtgeometrien aufgezeigt. Je nach Art der Rechnung (2D, 3D) und Geometrie muss eine entsprechende Zahl in das Feld im Bereich *Bond-line, Load and BC's* eingegeben werden. Es sind sechs Klebschichtdefinitionen verfügbar. In der vorliegenden Arbeit werden ausschließlich die in Abbildung 5.3 gezeigten Definitionen 1 und 2 verwendet. Eine 1 entspricht der in Abschnitt 4.3.2 gezeigten Geometrie (d). Die Randknoten der Klebschicht werden ausgehend von der Klebschichtmittellinie durch eine Normalenverschiebung definiert. Die Verschiebungsdistanz entspricht der halben, vorgegebenen Klebschichtdicke. Diese Geometrie garantiert im



Abbildung 5.3: Die beiden in dieser Arbeit verwendeten Klebschichtdefinitionen: Definition 1 dient der Erstellung einer konstanten Klebschicht durch Normalenverschiebung zur Klebschichtmittellinie (a) und Definition 2 zur Erstellung einer variablen Klebschicht durch Verschiebung in Längsrichtung des Gesamtmodells.

Fall der variablen Schäftungen eine konstante Klebschichtdicke. Wie in Abschnitt 4.3.2 gezeigt, liegen die Knickpunkte der Klebschicht innerhalb der Lagen. Die Eingabe einer 2 erzeugt die variable Schäftung durch eine Verschiebung der Knoten in Längsrichtung des Gesamtmodells (Abbildung 5.3). Dies entspricht der in Abschnitt 4.3.2 vorgestellten Geometrie (b). Es entsteht eine variable Klebschichtdicke mit den Knickpunkten in der Grenzschrift zweier benachbarter Laminatlagen. Die Verschiebung l_x in globaler x-Richtung wird durch eine Formel definiert und ergibt sich aus:

$$l_x = t_k / (2 \cdot \sin \theta) \quad (5.1)$$

Der zusätzliche, vom Schäftungswinkel abhängige, Faktor $1/\sin(\theta)$ ist notwendig, da die Klebschichtdicke t_k bei kleinen Schäftungswinkeln zu dünn wird. Bei einer eingestellten Klebschichtdicke von $t_k = 0,13$ mm ergeben sich in den 0° -Lagen 0,018 mm, in den $\pm 45^\circ$ -Lagen 0,059 mm und in den 90° -Lagen 0,27 mm für die Dicke der Klebschicht. Neben der entsprechenden Geometrie können in diesem Feld des Bereichs 1 auch eine Zuglast und Symmetrieeigenschaften definiert werden. Für die vorliegende Arbeit haben beide Felder keine Relevanz, da die Last in der Simulation wegbasiert aufgebracht wird und mit dem schon zuvor halbierten Couponmodell gerechnet wird.

2. Im Bereich 2 mit der Bezeichnung *Laminate Data* werden die Lamineigenschaften definiert. Für beide Fügepartner muss für jede Lage die Faserorientierung, die Lagendicke, der Schäftungswinkel und eine Materialnummer eingegeben werden. Prinzipiell können sich die Werte beider Fügeteile voneinander unterscheiden, um beispielsweise Reparaturflicken mit einem anderen Lagenaufbau zu untersuchen. In der vorliegenden Arbeit werden bei allen Simulationen für beide Lamine dieselben Werte verwendet. Für eine korrekte Generierung der .csv-Datei ist zu beachten, dass die Anzahl der Lagen beider Fügepartner übereinstimmt, alle Felder ausgefüllt sind und der komplette Lagenaufbau definiert wurde¹.
3. Im Bereich 3, bezeichnet als *Material Data*, werden die Eigenschaften des Laminats und des Klebstoffs eingegeben. Die entsprechende Materialnummer wird für die Laminatdaten im Bereich 2 benötigt. Der für eine Simulation verwendete Klebstoff muss auf Position 1 eingetragen werden.

Nach Eingabe aller Daten wird die Schaltfläche *Create CSV File* gewählt, woraufhin die .csv-Datei erstellt wird.

Im zweiten Preprocessing-Schritt wird die zuvor erstellte Datei nun mithilfe des PCL-Tools in *MSC Patran* eingelesen. Die Benutzeroberfläche des Tools ermöglicht die nachträgliche Änderung der in der .csv-Datei hinterlegten Informationen. Nach Auswahl der Schaltfläche *Apply* wird das FE-Modell

¹ Die Verwendung symmetrischer Lamineigenschaften ist nicht möglich.

erstellt. Die zur Anbindung der drei Bereiche benötigten Kontaktbedingungen sind ebenfalls in diesem Tool hinterlegt.

Nach der Erstellung des Modells werden in einem weiteren Schritt sog. *Session-files* (Endung .ses) eingelesen. Diese fügen den Elementen weitere Werkstoffeigenschaften, wie beispielsweise die elastisch-plastische Spannungs-Dehnungskurve des Klebstoffs, zu. Außerdem werden in diesem Schritt die bereits erwähnten TETRA-Elemente im klebschichtnahen Laminat erzeugt.

Abbildung 5.4 zeigt das in *MSC Patran* generierte Modell. Deutlich sind die drei Bereiche mit jeweils unterschiedlicher Netzfeinheit zu erkennen. Die in der Mitte schräg verlaufende Kontur stellt Teile der Klebschicht dar. Auch die Schäftungswinkeländerungen sind gut erkennbar. Das vollständige Modell hat je nach Geometrie ca. 310.000 Elemente, wovon ca. 30.000 auf die Klebschicht entfallen.

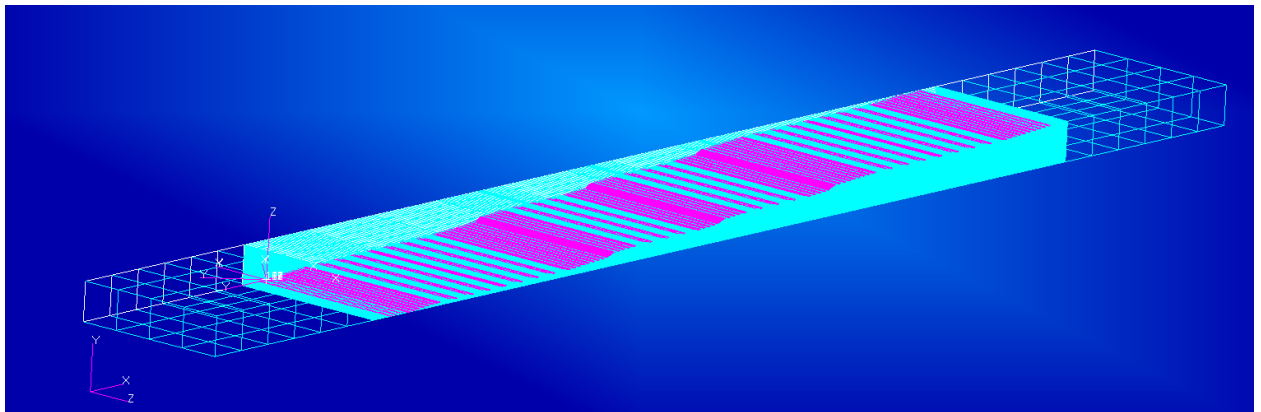


Abbildung 5.4: Gesamtansicht des in *MSC Patran* erstellten Simulationsmodells. Die unterschiedlichen Vernetzungen der drei Bereiche Umgebungsstruktur, Schäftungsbereich und Klebschicht sind gut erkennbar.

Die Last wird in den Simulationen weggebunden aufgebracht. Dazu muss eine zusätzliche Randbedingung erstellt werden. Die Probe wird über 20 Inkremente virtuell auf einer Länge von 3 mm gedehnt. Die Verschiebung greift im Bereich der Umgebungsstruktur an den Endknoten einer Probenstirnseite an. Die Knoten der andere Stirnseite sind virtuell eingespannt. Während der Simulation wird kein frühzeitiges Versagen simuliert.

Nach der Erstellung des Modells in *MSC Patran* wird mithilfe der *Analyse*-Funktion eine .bdf-Datei erstellt. Diese Textdatei stellt das vollständige Modell dar und wird zur Berechnung in *MSC Nastran* eingelesen. Für die in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Simulationen stand der Rechencluster des *Instituts für Faserverbundleichtbau und Adaptronik* zur Verfügung. Dadurch wurden bei der vorhandenen Modellgröße vergleichsweise kurze Simulationszeiten von 2-2,5 Stunden erreicht.

5.1.3 Auswertung der FE-Simulation

Nach der Berechnung wird die von *MSC Nastran* erstellte .Master-Ergebnisdatei in *MSC Patran* eingelesen. Die Spannungs- und Dehnungswerte können visuell am Gesamtmodell oder für einzelne Knoten durch Erstellen einer Textdatei ermittelt werden. Die von-MISES-Spannung bei einem Weganteil von 30 % ist in Abbildung 5.5 dargestellt. In der vorliegenden Arbeit werden die Werte an einzelnen Knoten ausgewertet. Dazu wird die von-MISES-Spannung und -Dehnung der mittleren Knotenreihe (über der Klebschichthöhe und Breite) ausgegeben und in *Excel* aufgetragen. Abbildung 5.6 zeigt die Positionen der ausgewählten Knoten in der Klebschicht. In Abbildung 5.6 (a) sind die Knoten in Breitenrichtung ausgewählt. Abbildung 5.6 (b) zeigt die Position der für die Auswertung ausgewählten mittleren Knoten über der Klebschichtdicke. Je nach Geometrie sind

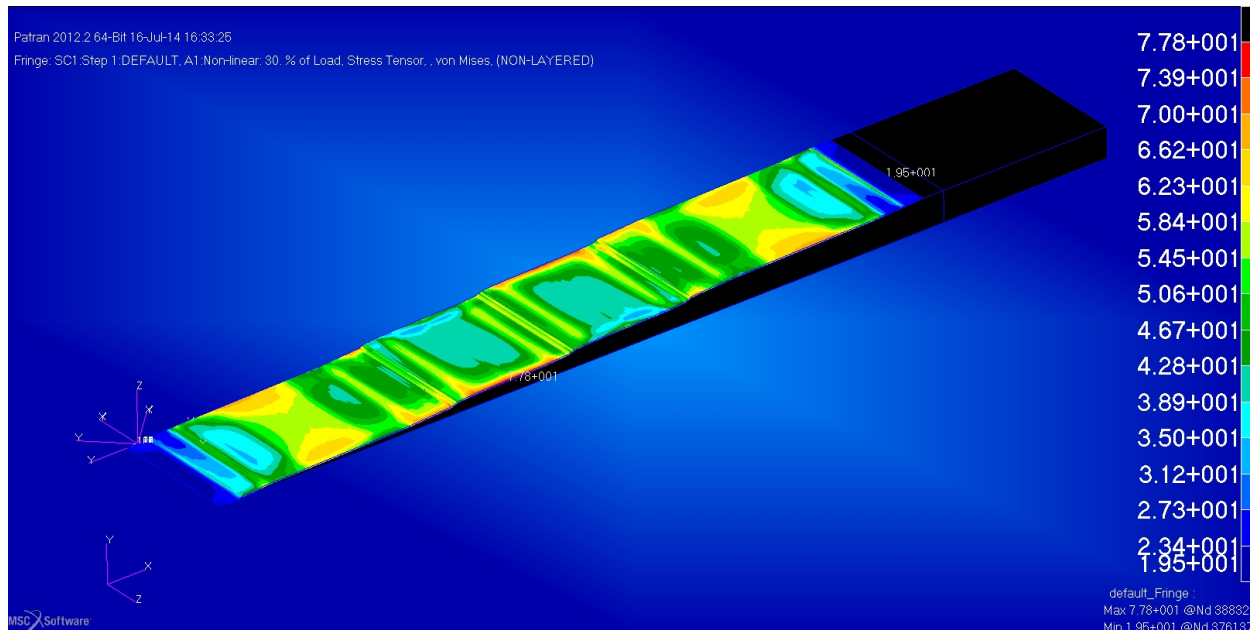
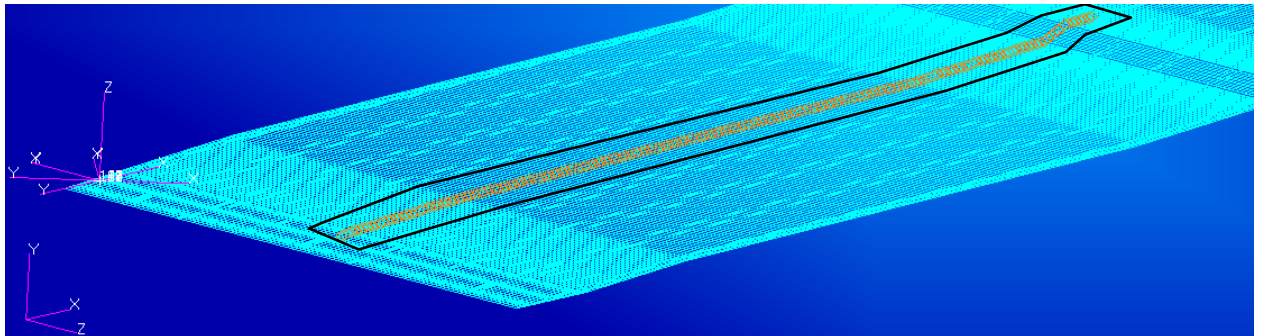


Abbildung 5.5: Visuelle Darstellung der von-Mises-Spannung bei einem Weganteil von 30 %. An den Probekörperrändern sind numerischen Effekte zu erkennen, die zu einer höheren Spannung führen.

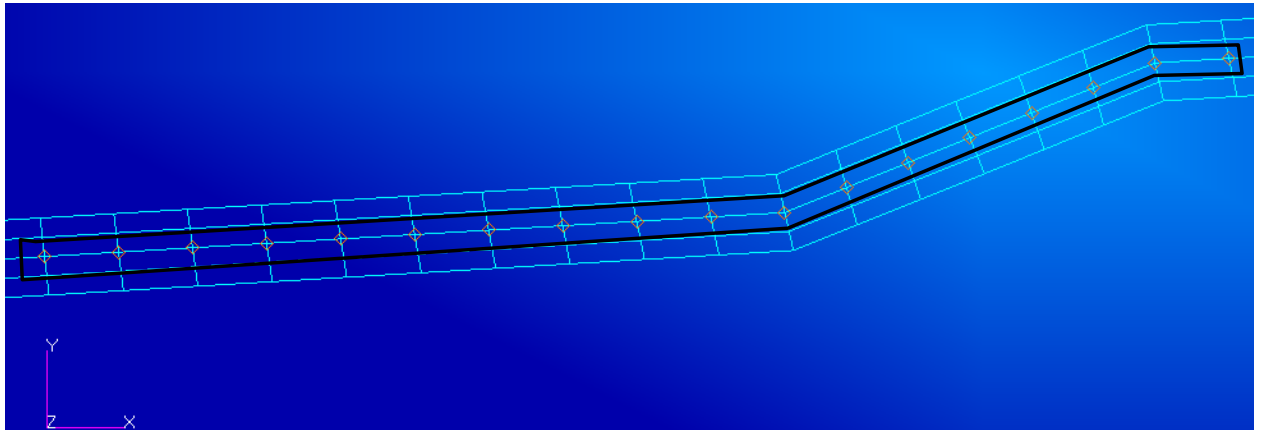
zwischen 400 und 600 Werte verfügbar. Eine Auswertung in Richtung der Probenbreite (z-Richtung) wird aufgrund der in Abbildung 5.5 dargestellten, numerischen Randeffekte nicht durchgeführt. Diese Vorgehensweise ist für eine Beschreibung des 2D-Spannungszustandes in der Klebschicht ausreichend. Bei flächigen Reparaturen wäre dies unzureichend.

Neben den in der Klebschicht herrschenden Spannungen und Dehnungen ist die Festigkeit der winkelvariablen Schäftung von Interesse. Zu Beginn der numerischen Untersuchung sollte das Versagen der Couponproben über eine Auswertung der angreifenden Lasten ermittelt werden. Bei dieser Methode werden die an der virtuell eingespannten Probenstirnseite liegenden Randknoten ausgewählt. Anschließend werden für jeden Wegschritt die an den Knoten anliegenden Kräfte für alle drei Raumrichtungen in einer Textdatei ausgegeben. Für die Auswertung sind nur die Kräfte in x-Richtung relevant. Die somit ermittelten Lasten werden in einem Kraft-Weg-Diagramm aufgetragen. In der Modellvorstellung verformen sich die Klebschichtelemente bei der Zugbelastung. Ab einem bestimmten Zeitpunkt ist die im Modell hinterlegte Grenzdehnung und damit eine entsprechende Grenzschubspannung erreicht. Ab diesem Punkt können die Elemente keine zusätzliche Last aufnehmen. Die Kraft-Weg Kurve steigt daher zu Beginn der Zugsimulation an und flacht schließlich, ab diesem „Sättigungspunkt“ ab. Der Knick im Verlauf wird als Punkt des Versagens ermittelt. Diese Kurvenform ist bei der Simulation einer konstanten Schäftung beobachtbar. Bei den Proben mit einer variablen Schäftung steigt die Kraft jedoch nach einem leichten Knick im Kraft-Weg-Diagramm weiter an.

Zur Analyse der Ursache dieses zusätzlichen, unphysikalischen Anstieg wurden verschiedene Referenzsimulationen durchgeführt. Als Laminat dienten 24 UD 0°-Lagen des in Abschnitt 4.2.1 beschriebenen CFK-Werkstoffs. Zunächst wurden drei Modelle mit konstanter Schäftung und unterschiedlichen Schäftungswinkeln simuliert. Ziel dieser Simulationen war es, die Größe des Schäftungswinkels als Ursache auszuschließen. Des Weiteren wurden sechs verschiedene variable Schäftungsgeometrien untersucht. Damit wurde der Einfluss einer Winkeländerung entlang der Klebschicht auf die Klebschichtelemente analysiert. In den Geometrien wiesen die ersten und letzten acht Lagen des Laminats jeweils den in Tabelle 5.1 aufgezeigten 1. Winkel auf und die acht



(a) Auswahl der mittleren Knotenreihe über der Probenbreite



(b) Auswahl der mittleren Knotenreihe über der Klebschichtdicke

Abbildung 5.6: Auswahl der mittleren Knotenreihe über der Probenbreite (a) und der Klebschichtdicke (b) für die Auswertung der Schubspannungsverteilung innerhalb der Klebschicht (schwarz umrandet) [Wö12]

mittleren Lagen den 2. Winkel. Die Winkeldifferenz zwischen beiden Schäftungswinkeln wurde jeweils modifiziert. In der Spalte *Kommentar* ist vermerkt bei welchen Simulationen ein zusätzlicher Anstieg der Kraft-Weg-Kurve auftritt. Die ermittelten Kurven sind in Abbildung 5.7 dargestellt.

Tabelle 5.1: Übersicht über die durchgeführten Simulationen zur Analyse des weiteren Kraftanstiegs

Bezeichnung	1.Winkel	2.Winkel	Delta	Kommentar
TS-K-1	2,86			
TS-K-2	22			
TS-K-3	5,71			
TS-V-1	5,71	22	16,3	zus. Anstieg
TS-V-2	5,71	1	4,71	
TS-V-3	2	6,71	4,71	
TS-V-4	2,86	7,8624	5	zus. Anstieg
TS-V-5	2,86	22	19,14	zus. Anstieg
TS-V-6	2,86	30	27,14	zus. Anstieg

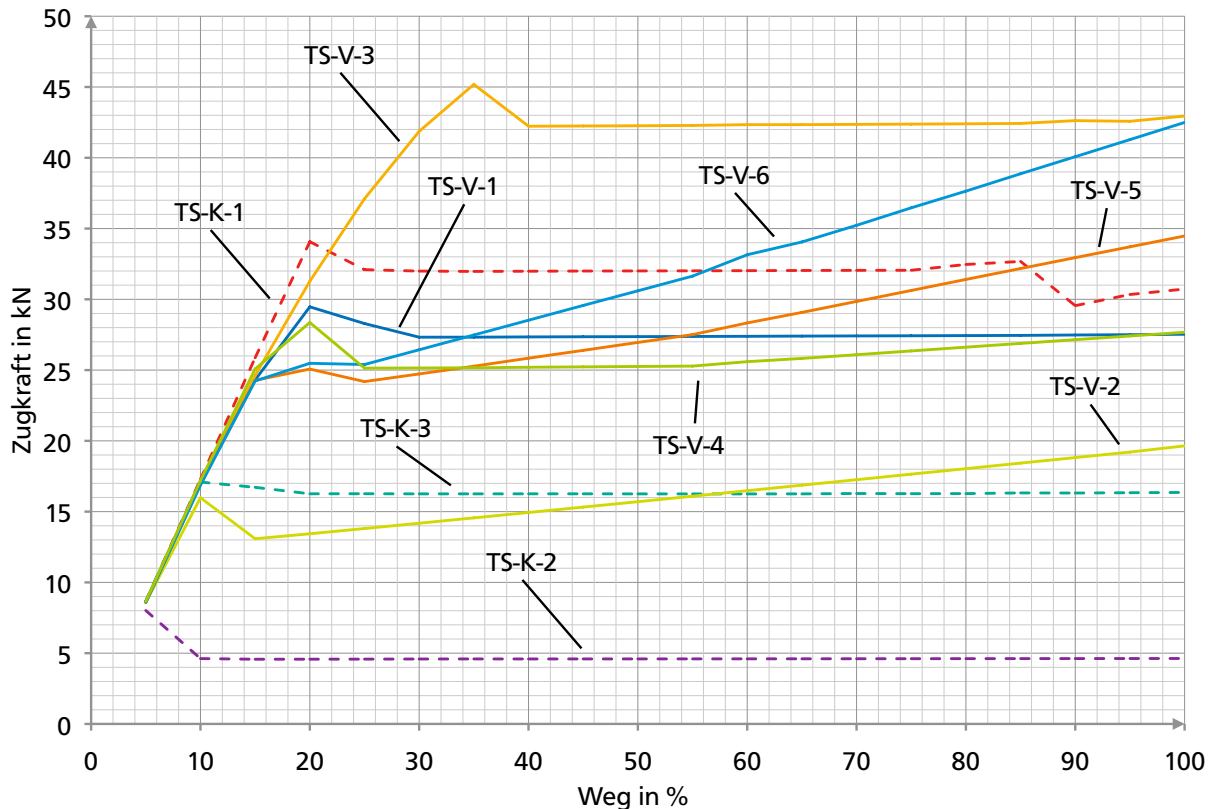


Abbildung 5.7: Kraft-Weg-Kurven der durchgeführten Simulationen zur Analyse des unphysikalischen Kraftanstiegs

Bei vier variablen Schäftungen ist ein weiterer Anstieg erkennbar. Die Kurve der Simulation TS-V-4 beschreibt nach dem ersten Knick zunächst eine Konstante. Ab ca. 55 % des Weges steigt diese nach einem weiteren Knickpunkt nochmals an. Auffällig ist, dass bei allen Simulationen mit einer konstanten Schäftung (gestrichelte Kurven), unabhängig von der Größe des Schäftungswinkels, kein zusätzlicher Anstieg eintritt. Bei den variablen Schäftungen ist dieser Effekt für alle Simulationen ab einem Differenzwinkel größer als $4,71^\circ$ zu beobachten. Je größer dieser Winkel, desto steiler ist der weitere Kraftanstieg nach dem ersten Knickpunkt. Simulation TS-V-4 zeigt, dass bereits ab einem Differenzwinkel von 5° eine flache Steigung auftritt.

Generell lässt der zu beobachtende Verlauf die Annahme zu, dass eine Kontaktbedingung zwischen den beiden Fügepartnern, d.h. über die Klebschicht hinweg, besteht. In diesem Fall wäre ein weiterer Anstieg möglich, da dieser Kontakt die anliegende Last nach Erreichen der Klebschichtgrenzdehnung übertragen würde. Aus diesem Grund wurden weitere, hier nicht aufgezeigte Simulationen durchgeführt. Dabei lag der Fokus der Analyse auf einer veränderten Klebschichtanbindung und modifizierten Kontaktbedingungen. Alle Veränderungen an diesen Parametern zeigten keine Änderung des Kurvenverlaufs.

Das Problem wurde soweit analysiert, dass eine starke Dehnung der Klebschichtelemente nach Erreichen der Grenzdehnung der wahrscheinlichste Grund für das unphysikalische Verhalten ist. Aus der *MSC Nastran*-Dokumentation geht nicht hervor, wie sich die Elemente bei starker Dehnung verhalten und ob sich eventuelle Veränderungen in den numerischen Lösungsmethoden ergeben.

Da trotz intensiver Analyse keine Lösung für das auftretende Problem gefunden wurde, wird die Auswertung des Probenversagens mit einer anderen Methode durchgeführt. Dazu muss zunächst ebenfalls die an den Probenendknoten anliegende Last für jeden Wegschritt extrahiert werden. In einem zweiten Schritt wird für jedes Inkrement der prozentuale Anteil der Klebschichtelemente

ermittelt, welcher die hinterlegte, maximale *VON-MISES*-Dehnung erreicht hat. Dazu wird ein *Session file* in *MSC Patran* eingelesen. Alle Klebschichtelemente werden auf Erfüllung des Versagenskriteriums hin abgesucht. Überschreitet die Anzahl der Elemente eine Grenze von 1 %, wird von Gesamtversagen der Probe ausgegangen. Das *Session file* gibt eine Textdatei mit dem prozentualen Anteil an versagten Elementen für jeden Wegschritt aus. Beide Textdateien werden in eine *Excel*-Datei eingelesen. Für jeden der 20 Wegschritte wird ein diskreter Wert des prozentualen Anteils an versagten Elementen ausgegeben. Liegt die 1 %-Grenze zwischen zwei Schritten, so muss die genaue Versagenslast durch lineare Interpolation ermittelt werden. Abbildungen 5.8 und 5.9 zeigen das Auswerteverfahren grafisch dargestellt. In Abbildung 5.8 ist auf der x-Achse der relative Weganteil aufgetragen; die y-Achse zeigt den prozentualen Anteil an versagten Elementen. Die rot gestrichelte Linie beschreibt die Grenze, bei der 1 % der Klebschichtelemente die kritische *VON-MISES*-Dehnung erreicht haben. Anhand des zurückgelegten Weges wird über das in Abbildung 5.9 gezeigte Last-Weg-Diagramm die entsprechende Versagenslast ermittelt. Diese muss aufgrund der simulierten Probenbreite von 12 mm mit dem Faktor 2,032 auf die gesamte Probenfläche hochgerechnet werden. Daraus ergibt sich über die Probenquerschnittsfläche *A* die Versagensspannung. *A* wird dabei als

$$A = b \cdot t = 25,4 \text{ mm} \cdot 3 \text{ mm} = 76,2 \text{ mm}^2 \quad (5.2)$$

angenommen. Ist die Versagenslast bekannt, kann auch die Bruchdehnung über den entsprechenden Wegschritt ermittelt werden. Da bekannt ist, dass 100 % zurückgelegter Weg einer Länge von 3 mm entspricht, wird der zurückgelegte Weg bis zum Versagen errechnet. Die Bruchdehnung kann anschließend mithilfe der Probenkörperlänge von 110 mm errechnet werden.

Für die Auswertung der numerischen und experimentellen Untersuchungen wird bei Vorhandensein mehrerer Messwerte von einer Normalverteilung der Werte ausgegangen. Neben dem arithmetischen Mittelwert wird für manche Auswertungen die Standardabweichung *s* ermittelt. Die Berechnung erfolgt mit der Formel:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{k=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (5.3)$$

Im ursprünglichen Simulationsmodell wird neben dem *VON-MISES*-Versagenskriterium für Klebschichtversagen auch das *PUCK*-Kriterium für Laminatversagen ausgewertet. Dabei werden die Elemente ähnlich wie in der Klebschicht auf Erfüllung des *PUCK*-Kriteriums durchsucht. Versagen mehr als 1 % dieser Elemente, so wird von einem Laminatversagen ausgegangen. Zur Ermittlung der Versagenslast bei den hier analysierten variablen Schäftungen wird auf diese Auswertungsmethode verzichtet. Es wird ausschließlich von reinem Klebschichtversagen ausgegangen. Die Vereinfachung ist aus folgenden Gründen zulässig:

- Die in Abschnitt 4.2 durchgeführten Zugversuche zeigen, dass Versagen bei den geklebten Proben deutlich früher als bei den reinen Laminatproben eintritt. Es ist davon auszugehen, dass Klebschichtversagen die vorherrschende Versagensart ist, da die Klebschicht eine deutlich niedrigere Festigkeit als das reine Laminat aufweist. Die Klebschicht ist versagensinitiiierend. Wie in Abschnitt 3.4 beschrieben, zeigten Versuche mit verschiedenen Schäftungswinkeln kohäsives Klebschichtversagen bei $\theta > 1^\circ$. Die in den Simulationen verwendeten Winkel liegen oberhalb dieses Grenzwerts.
- Die von WÖLPER durchgeführten Simulationen für konstante Schäftungen zeigten im Vergleich zu den Zugversuchen eine um 24 % (QI1) bzw. 42 % (QI3) zu niedrige Versagenslast bei Auswertung des *PUCK*-Kriteriums [Wö14]. Das *VON-MISES*-Kriterium erreichte eine deutlich bessere Annäherung an die erreichten Zugfestigkeiten.

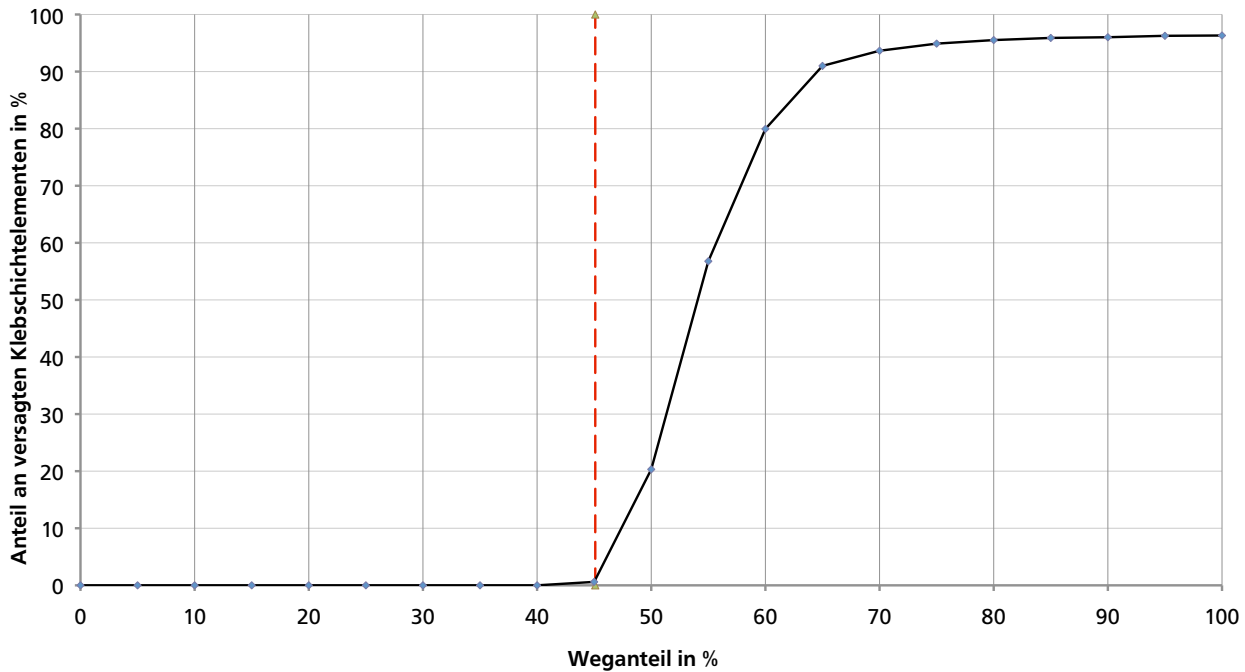


Abbildung 5.8: Auswertung des Anteils versagter Klebschichtelemente über den zurückgelegten Weg. Die rot gestrichelte Linie gibt das 1%-Versagenskriterium an.

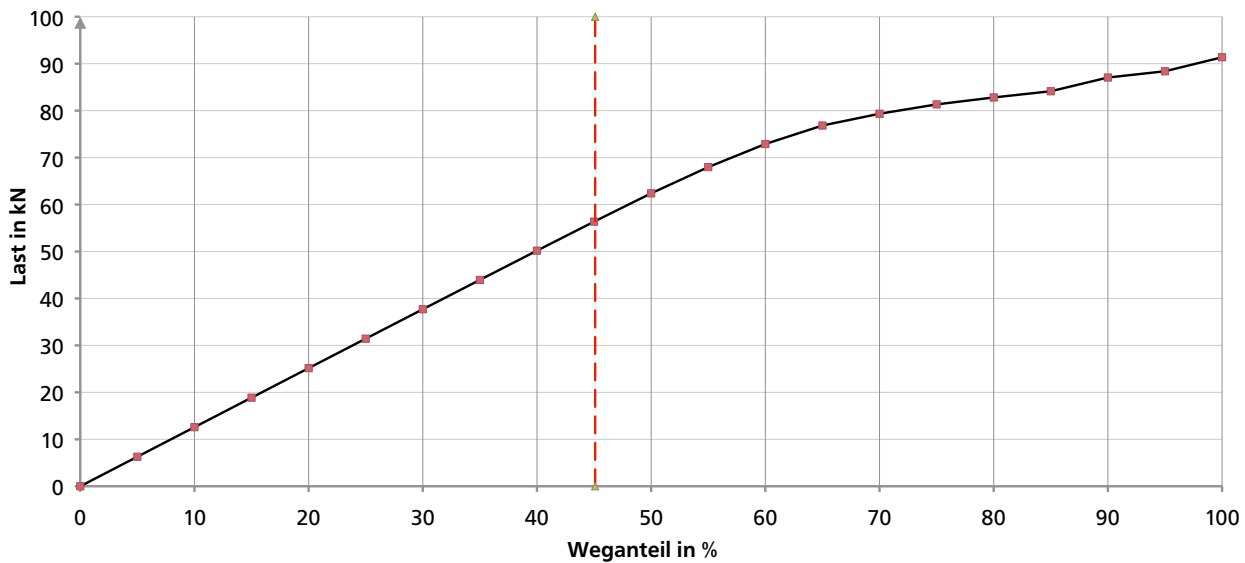


Abbildung 5.9: Aus dem zuvor bestimmten Weganteil (rot gestrichelte Linie) wird eine Versagenslast ermittelt.

- Bei der variablen Schäftungsgeometrie ist es nicht möglich, den Bereich der auf PUCK-Versagen zu untersuchenden Laminatenelemente automatisiert festzulegen. Diese Bereiche manuell zu definieren ist sehr aufwendig und bezüglich der Reproduzierbarkeit für unterschiedliche Geometrien unsicher. Aufgrund des komplexen und detailliert aufgebauten Modells ist eine Vollständigkeit nicht garantiert. Dies betrifft vor allem die Elemente in z-Richtung. Eine Auswertung des kompletten Laminats auf PUCK-Versagen ist ebenfalls unzuverlässig, da vereinzelt auftretende numerische Effekte die 1 %-Grenze herabsetzen und ein vermeintlich früheres Versagen ermittelt wird.

- Das 1 %-PUCK-Versagenskriterium für den Laminatbereich ist derzeit noch nicht ausreichend validiert. Es ist nicht bewiesen, dass bei Versagen einiger weniger Bereiche des Laminats ein Gesamtversagen auftritt, da die versagten Elemente beispielsweise durch Lastumlagerungen entlastet werden. Es ist zudem nicht bekannt, welcher prozentuale Faktor für eine korrekte Vorhersage angewendet werden kann. Die komplexen Versagensmechanismen in Klebungen sind Gegenstand der aktuellen Forschung.

5.1.4 Einfluss der Vernetzung

Zur Validierung des FE-Modells wird eine Netzanalyse durchgeführt. Diese ist notwendig um den Einfluss der Vernetzung zu überprüfen und eine Verfälschung der Ergebnisse durch eine unzureichende Netzfeinheit zu vermeiden. Dazu wird die Netzfeinheit eines Referenzmodells in allen drei globalen Raumrichtungen variiert. Der Probekörper besteht aus Laminataufbau QI1 und der variablen Schäftung mit idealen Schäftungswinkeln (Bezeichnung: QI1-V-1, siehe Abschnitt 5.2). Zum Vergleich werden die VON-MISES-Spannungsverläufe in der Klebschicht bei einem zurückgelegten Weg von 30 % miteinander verglichen². Die Ausgangsvernetzung des Modells basiert auf den Untersuchungen von WÖLPER [Wö14]. Bei der Netzfeinheit muss ein Kompromiss zwischen Modellgröße und Genauigkeit der Rechnung gefunden werden. Obwohl mit dem Rechencluster eine geringe Simulationszeit erreicht wird, ist ab einer bestimmten Dateigröße die Auswertung auf dem zur Verfügung stehenden Desktop-PC nicht mehr möglich. Die durchgeführten Simulationen mit entsprechender Vernetzung sind in Tabelle 5.2 aufgeführt.

Netzfeinheit der Probenhöhe (y-Richtung)

Der erste Teil der Tabelle 5.2 zeigt eine Übersicht über die durchgeführten Versuche mit verschiedener Vernetzung der Probenhöhe. Diese wird eingestellt, in dem in der .csv-Datei die Anzahl der Elemente über der Höhe pro Lage und der Klebschicht eingegeben wird³. Zunächst wird die Elementanzahl über der Klebschichtdicke konstant gehalten und jene der Lagen in drei Simulationen erhöht. Anschließend wird das selbe für die Klebschichtelemente durchgeführt. Wie der Tabelle zu entnehmen ist, führt eine zu feine Vernetzung zu Modellgrößen, die nicht ausgewertet werden können (Simulationen QI1-V-1-NY3, QI1-V-1-NY6, QI1-V-1-NY7 und QI1-V-1-NY8). Abbildung 5.11 zeigt die VON-MISES-Spannungsverläufe in der Klebschicht bei 30 % des Gesamtweges (0,9 mm). Eine Erhöhung der Elemente in y-Richtung hat keine Auswirkung auf die Spannungsverteilung. Daher ist die Vernetzung mit drei Elementen über die Höhe pro Lage und vier Elementen (d.h. Eingabe einer 2) über die Höhe der Klebschicht ausreichend.

Netzfeinheit der Klebschichtelemente (x-Richtung)

Für die Netzfeinheit der Klebschicht in x-Richtung wird im *Excel*-Tool ein konkreter Abstand in der Einheit *mm* eingegeben. Der mittlere Teil der Tabelle 5.2 zeigt eine Übersicht über diese Simulationen. Die Auswirkung einer feineren Vernetzung wird in zwei Berechnungen überprüft. Zunächst wird der Ausgangswert von 0,125 mm auf 0,0625 mm halbiert (Simulation QI1-V-1-NX1). Anschließend wird der Abstand auf 0,09375 mm erhöht (entspricht 2/3 der Ausgangsvernetzung, Simulation QI1-V-1-NX2). Die Länge der Laminatenelemente in globaler x-Richtung kann in der .csv-Datei nicht konkret eingegeben werden und wird vom Modell anhand der Klebschichtvernetzung automatisch generiert. Die feinere Vernetzung zeigt keine Änderung im Schubspannungsverlauf, weshalb für die Simulationen 0,125 mm als Länge der Klebschichtelemente verwendet wird.

² Dieser Weganteil eignet sich besonders für einen Vergleich der Spannungsverläufe, da eine ausreichende Spannungsausprägung vorhanden ist, die Elemente jedoch noch nicht die Grenzdehnung erreicht haben

³ Bei der Klebschicht entspricht der eingegebene Wert der Vernetzung der halben Klebschichtdicke.

Tabelle 5.2: Übersicht über die durchgeführten Simulationen für die Netzanalyse

Bezeichnung	x-Richtung	y-Richtung		z-Richtung		Kommentar
	Klebschicht	Laminat	Klebschicht	Laminat	Klebschicht	
Einheit	mm	Elementanz.	Elementanz.	mm	mm	
QI1-V-1-NY1	0,125	3	2	1,25	1,5625	
QI1-V-1-NY2	0,125	4	2	1,25	1,5625	
QI1-V-1-NY3	0,125	5	2	1,25	1,5625	Modell zu groß
QI1-V-1-NY4	0,125	4	3	1,25	1,5625	
QI1-V-1-NY5	0,125	4	4	1,25	1,5625	
QI1-V-1-NY6	0,125	5	3	1,25	1,5625	Modell zu groß
QI1-V-1-NY7	0,125	6	3	1,25	1,5625	Modell zu groß
QI1-V-1-NY8	0,125	5	2	1,25	1,5625	Modell zu groß
QI1-V-1-NX1	0,0625	4	3	1,25	1,5625	
QI1-V-1-NX2	0,09375	4	3	1,25	1,5625	
QI1-V-1-NZ1	0,125	3	2	1,25	1,5625	
QI1-V-1-NZ2	0,125	3	2	1,25	0,78125	
QI1-V-1-NZ3	0,125	3	2	0,893	1,5625	
QI1-V-1-NZ4	0,125	3	2	1	1	
QI1-V-1-NZ5	0,125	3	2	0,8333	0,8333	
QI1-V-1-NZ6	0,125	3	2	0,6944	0,6944	
Ergebnis	0,125	3	2	1	1	Verw. Vernetzung

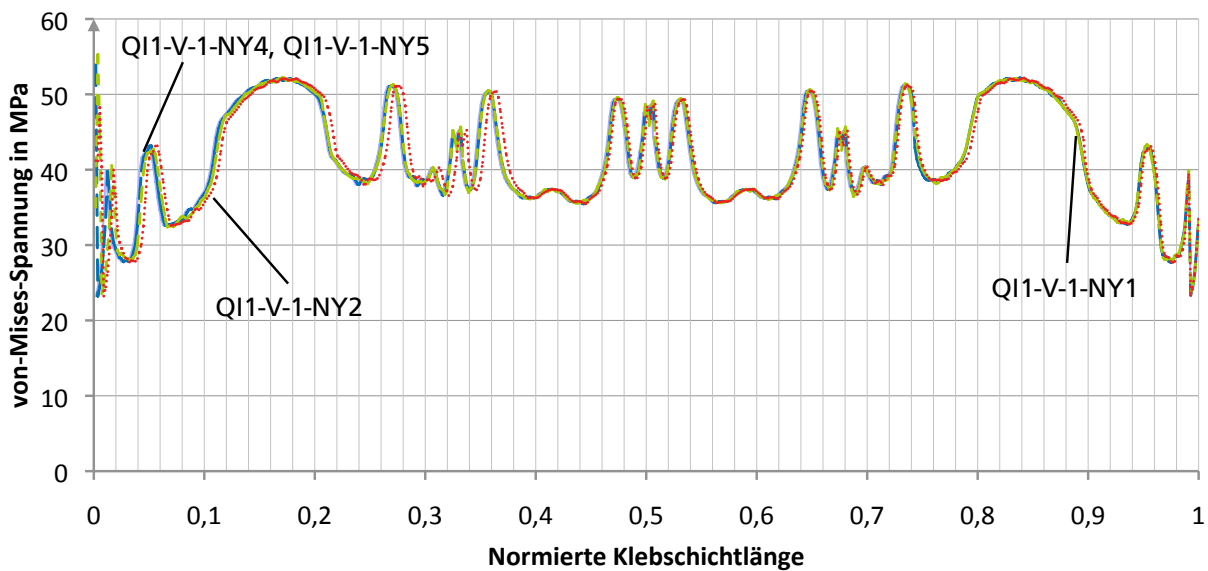


Abbildung 5.10: Auswertung der von-MISES-Spannungen bei 30 % des Gesamtweges für Simulationen mit verschiedener Elementanzahl über der Probenhöhe (y-Richtung)

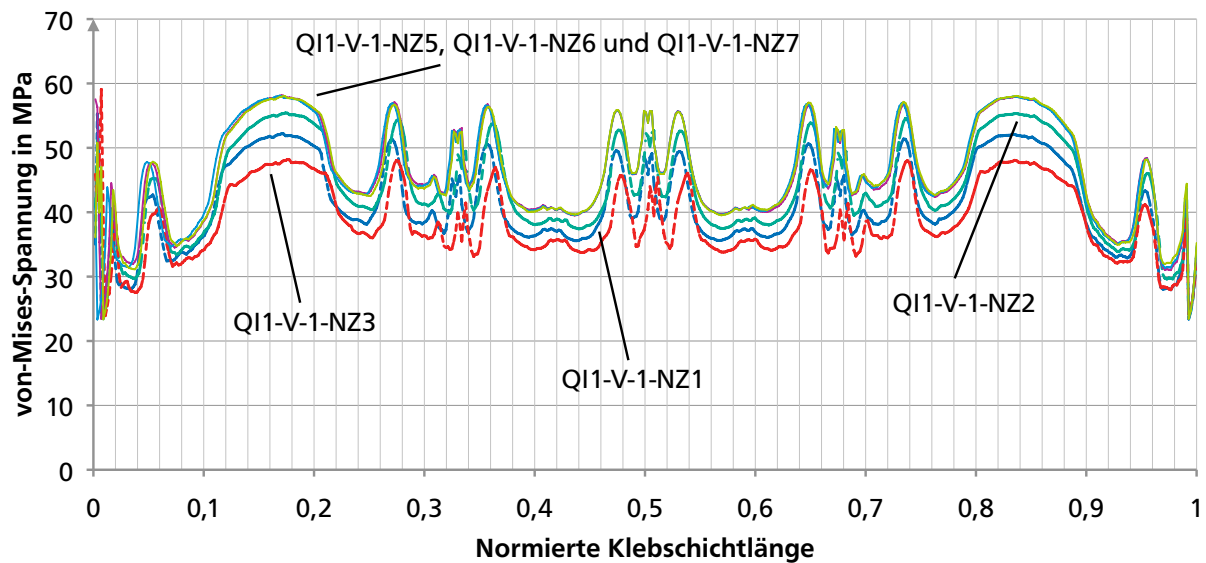


Abbildung 5.11: Auswertung der von-MISES-Spannungen bei 30 % des Gesamtweges für Simulationen mit verschiedener Vernetzung über der Probenbreite (z-Richtung)

Netzfeinheit der Probenbreite (z-Richtung)

Im letzten Teil der Tabelle 5.2 ist eine Übersicht über die durchgeführten Simulationen zur Vernetzung der Probenbreite, d.h. in globaler z-Richtung, dargestellt. Dabei wird ausgehend von der ursprünglichen Elementbreite (1,25 mm im Laminat und 1,5625 mm in der Klebschicht) zunächst jeweils die Breite der Klebschicht- und Laminelemente einzeln verkleinert (Simulation QI1-V-1-NZ2 und QI1-V-1-NZ3). Anschließend werden Simulationen mit gleichen Elementbreiten durchgeführt (Simulationen QI1-V-1-NZ4, QI1-V-1-NZ5 und QI1-V-1-NZ6). Abbildung 5.11 zeigt die verschiedenen von-MISES-Spannungen bei 30 % des Gesamtweges. Die Spannungsverläufe der Modelle QI1-V-1-NZ1, QI1-V-1-NZ2 und QI1-V-1-NZ3 weichen gegenüber den restlichen Simulationen ab. Beträgt die Vernetzungslänge der Elemente in z-Richtung kleiner als 1 mm, so liegen die Spannungsverläufe aufeinander. Da eine feinere Vernetzung den Rechenaufwand erhöht, wird in Klebschicht und Laminat mit einer gleichen Elementbreite von 1 mm in z-Richtung gerechnet.

Die schließlich in den Simulationen verwendete Vernetzung ist in Tabelle 5.2 unter der Bezeichnung *Ergebnis* aufgeführt.

Einfluss der Klebschichtanbindung

Zu Beginn der numerischen Untersuchung zeigten sich im von-MISES-Spannungsverlauf signifikante, unphysikalische Spannungsspitzen. Diese waren auf eine unzureichende Verbindung des Laminats mit der Klebschicht über die voreingestellten Kontaktbedingungen zurückzuführen. Vor allem an den 90°-Lagen und damit in Bereichen großer Schäftungswinkel bildeten sich bei höheren Lasten Ablösungen zwischen den beiden Elementgruppen. Bei Simulationen mit konstanten Schäftungen und ausschließlich flachen Schäftungswinkeln waren diese nicht zu beobachten. Bei der zuvor beschriebenen, automatisierten Modellgenerierung einer variablen Schäftung, entstehen an manchen Stellen Überlappungen des Laminats mit der Klebschicht. Andere Bereiche weisen wiederum einen Spalt auf. Die Kontaktbedingungen werden über die *Session files* bei der Generierung des Modells bereits implementiert. Die Parameter können jedoch auch direkt in der *.bdf*-Datei geändert werden. Abbildung 5.12 zeigt den betreffenden Ausschnitt. Der Eintrag *BCPARA* definiert die generellen Kontaktbedingungen [MSC13]. Die dahinter stehende Null zeigt an, dass diese für alle darunter

34	PARAM, NOCOMPS, 0								
35	PARAM	PRTMAXIM	YES						
36	PARAM	MRNOECHO	123						
37	BCPARA	0	NLGLUE	1	NBODIES	3			
38	NLPARM	1	20		FNT		25	PVA	YES
39	BCTABLE	0			(2)				
40		SLAVE	2	.008125				2	
41			0	0	0				
42		MASTERS	1						
43		SLAVE	3					1	
44			0	0	0				
45		MASTERS	2						

Abbildung 5.12: Ausschnitt aus der *.bdf*-Datei mit einer verbesserten Klebschichtanbindung an das umgebene Laminat. Die geänderten Einträge sind markiert.

aufgeführten Modellgruppen gilt. Einer der Einträge ist die Bedingung *NLGLUE*. Diese muss bei variablen Schäftungen von 0 auf 1 geändert werden. Damit wird eine *glued contact*-Bedingung aktiviert, welche die Verklebung zweier Körpern auch bei nicht vorhandenem Initialkontakt oder Überlappung der Elemente im Modell garantiert. In der eigentlichen Kontakttabelle mit der Bezeichnung *BCTABLE* muss zusätzlich die Stelle *IGLUE* auf 2 geändert (zuvor kein Eintrag an dieser Stelle). Diese Änderung aktiviert eine *glue option*, d.h. eine Verklebung der Laminatknoten mit der Klebschicht. Bei der Modellgenerierung entstandene Überlappungen oder Ablösungen der Elemente werden nicht verändert, da die betroffenen Knoten nicht auf die Klebschicht verschoben werden. Daher muss in die Stelle *ERROR* ein Abstandswert eingefügt werden, der geringfügig größer als der Initialspalt ist. Ist der Abstand der Knoten des Laminats von der Klebschicht geringer als dieser Wert, so greift die *glue option*. Für die variablen Schäftungen sollte der Wert 0,008125 betragen. Die zu ändernden Positionen sind in Abbildung 5.12 markiert. Spezifische Informationen zu genauen Positionen und Bezeichnungen, sowie der verschiedenen Kontaktbedingungen, können dem *MSC Nastran 2013.1 Quick Reference Guide* [MSC13] entnommen werden.

5.2 Durchführung und Ergebnisse

Die FE-Simulationen dienen der Analyse des Einflusses unterschiedlicher Faktoren auf die Zugfestigkeit der variablen Schäftung. Die durchgeführten Untersuchungen sind in fünf Schritte eingeteilt:

1. Die ersten FE-Analysen konzentrieren sich auf den Einfluss variabler Schäftungswinkel auf den VON-MISES-Spannungsverlauf und die Festigkeit im Allgemeinen. Dazu werden grundlegende Simulationen mit Lagenaufbau QI1 durchgeführt. Im Speziellen wird der Einfluss der Winkeländerung in den einzelnen Lagen auf den Schubspannungsverlauf untersucht. Außerdem werden die in Abschnitt 4.3.2 getroffenen Annahmen zur variablen Klebschichtdicke verifiziert, in dem eine Simulation mit der dort vorgestellten Geometrie (b) durchgeführt wird.
2. Um den Einfluss des Lagenaufbaus zu analysieren, werden in einem zweiten Schritt die selben Simulationen mit Lagenaufbau QI3 wiederholt.
3. In einer dritten Simulationsreihe wird untersucht, inwiefern variable Schäftungswinkel unabhängig von der Faserorientierung der Lagen durch Analyse des Spannungsniveaus angepasst werden können. Ziel ist die Festigkeitssteigerung bei gleichbleibender Reparaturlänge L.
4. Anschließend wird die Möglichkeit einer verkürzten Reparaturlänge L untersucht. Dazu werden die einzelnen Schäftungswinkel erhöht, bis die Probenfestigkeit jener einer konstanten Schäftung entspricht.

5. Die fünfte Simulationsreihe analysiert den Einfluss von ETD-Bedingungen auf die Zugfestigkeit der Proben.

Im Folgenden werden die einzelnen Simulationsschritte im Detail vorgestellt.

5.2.1 Simulationen mit Laminataufbau QI1

Ausgehend von den in Abschnitt 4.3.2 aufgezeigten Schäftungswinkeln wird die ideale Schäftungsgeometrie mit Laminattyp QI1 simuliert. Wie bereits erwähnt, beträgt die Reparaturlänge bei dieser Probe $L = 70$ mm. Die vergleichende 1:20-Schäftung weist eine Reparaturlänge von $L = 60$ mm auf. Aus diesem Grund werden in einem zweiten Schritt verschiedene variable Schäftungen mit dieser Reparaturlänge ausgelegt. Für die Variation der Ausgangsgeometrie kann, im Gegensatz zur idealen Schäftung, auf keine Elastizitätsmodul-Abhängigkeit zurückgegriffen werden. Die Winkel werden daher soweit reduziert, dass sich eine Reparaturlänge von 60 mm ergibt. Zunächst wird der ideale Schäftungswinkel der $\pm 45^\circ$ -Lage von $3,4^\circ$ auf $5,65^\circ$ erhöht (Bezeichnung: QI1-V-2). Die Schäftungswinkel der 0° -Lage (1°) und der 90° -Lage ($21,4^\circ$) bleiben erhalten. In einer zweiten Simulation wird der Schäftungswinkel der 0° -Lage erhöht; die der $\pm 45^\circ$ - und 90° -Lagen bleiben konstant (Bezeichnung: QI1-V-3). Durch eine alleinige Erhöhung des 90° -Lagen Schäftungswinkels kann keine Reduktion der Reparaturlänge um 10 mm erreicht werden. Anhand der 0° - und 45° -Lagen Winkelmodifikation ist eine Aussage über den Einfluss der Lagenorientierung auf den Spannungsverlauf und die Probenfestigkeit möglich. Bei einer dritten Variation werden die Winkel in der Form ausgelegt, dass die 90° -Lagen einer 1:10-Schäftung ($5,71^\circ$), die $\pm 45^\circ$ -Lagen einer 1:20-Schäftung ($2,86^\circ$) und die 0° -Lagen einer 1:30-Schäftung ($1,9^\circ$) entsprechen (Bezeichnung QI1-V-31). Bei Einhaltung dieser Verhältnisse wird aufgrund der Geometrie ebenfalls eine Reparaturlänge von 60 mm erreicht. Durch die geringe Winkeldifferenz zur konstanten Schäftung weist die Klebschicht nur leichte Knicke auf. Dies ermöglicht die Analyse des Einflusses unterschiedlich starker Winkeländerungen der Klebschicht auf den Spannungsverlauf. Um die in Abschnitt 4.3.2 gemachten Annahmen zur variierenden Klebschichtdicke zu verifizieren, wird eine Simulation mit der in Abbildung 4.7 gezeigten Klebschichtgeometrie (b) durchgeführt. Bei der als QI1-V-L bezeichneten Probe liegen die Knickpunkte der Grenzschicht von Laminat und Klebstoff auf den Lagenübergängen und die Klebschicht ist nicht konstant. Im Bereich der 90° -Lagen weist diese Geometrie die größte Klebschichtdicke auf.

Tabelle 5.3: Übersicht über die variablen Schäftungssimulationen für den Laminataufbau QI1

Bezeichnung	Schäftungswinkel			Reparaturlänge L
	0° -Lage	$\pm 45^\circ$ -Lage	90° -Lage	
QI1-K-1 (CAIRE-IM7-1-TEN-D-RT-K-1)	$2,454^\circ$	$2,454^\circ$	$2,454^\circ$	70 mm
QI1-K-2 (CAIRE-IM7-1-TEN-D-RT-K-2)	$2,862^\circ$	$2,862^\circ$	$2,862^\circ$	60 mm
QI1-V-1 (CAIRE-IM7-1-TEN-D-RT-V-1)	1°	$3,4^\circ$	$21,4^\circ$	70 mm
QI1-V-2 (CAIRE-IM7-1-TEN-D-RT-V-2)	1°	$5,65^\circ$	$21,4^\circ$	60 mm
QI1-V-3 (CAIRE-IM7-1-TEN-D-RT-V-3)	$1,3^\circ$	$3,4^\circ$	$21,4^\circ$	60 mm
QI1-V-31 (CAIRE-IM7-1-TEN-D-RT-V-31)	$1,9^\circ$	$2,9^\circ$	$5,7^\circ$	60 mm
QI1-V-L (CAIRE-IM7-1-TEN-D-RT-V-L)	1°	$3,4^\circ$	$21,4^\circ$	70 mm

Als Referenz werden Simulationen mit einem konstanten Schäftungswinkel und einer Reparaturlänge von 70 mm (Bezeichnung: QI1-K-1, Schäftungswinkel: $2,454^\circ$) bzw. 60 mm (Bezeichnung:

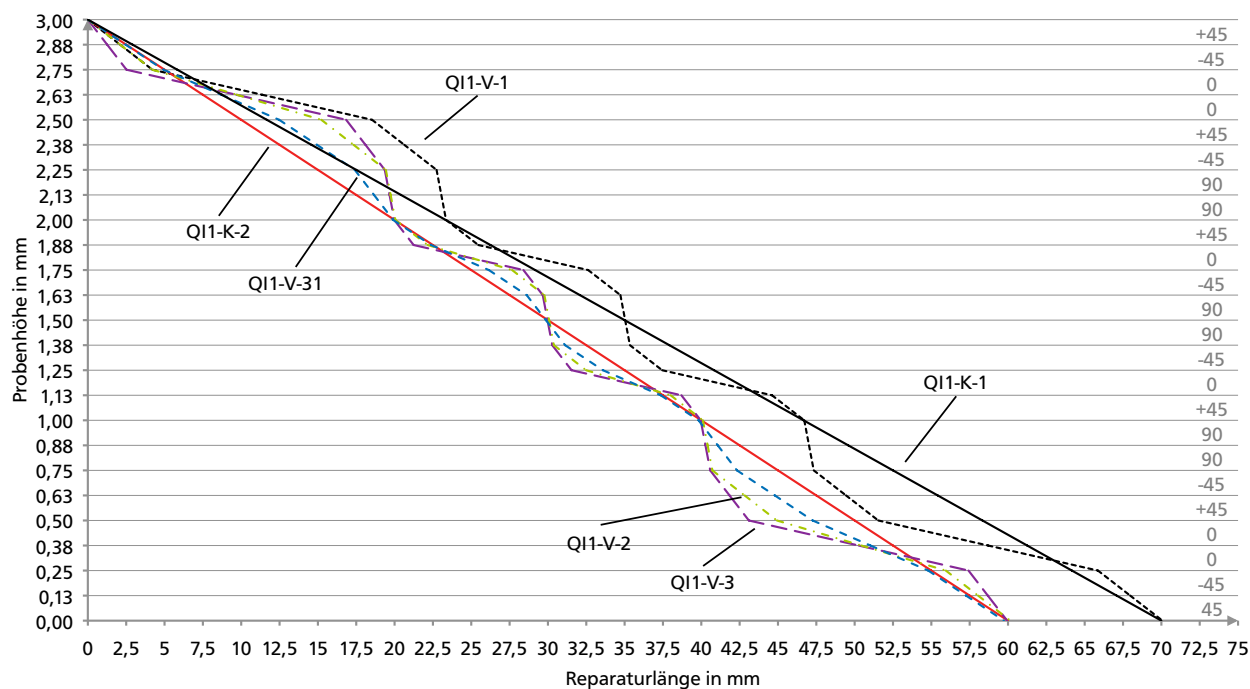


Abbildung 5.13: Schäftungsgeometrien der Simulationen mit Laminat QI1. Die Klebschichtdicke wird vernachlässigt.

QI1-K-2, Schäftungswinkel $2,862^\circ$) durchgeführt. Alle mit Laminat QI1 durchgeführten Simulationen sind mit Bezeichnung und den verwendeten Schäftungswinkeln in Tabelle 5.3 aufgeführt⁴. Abbildung 5.13 zeigt eine Seitenansicht der Schäftungsgeometrien im Vergleich. Die Klebschichtdicke wird in dieser Darstellung vernachlässigt. Deutlich ist zu erkennen, dass die Geometrie der Simulation QI1-V-31 der konstanten Schäftung im größeren Maße folgt als die Geometrien QI1-V-2 und QI1-V-3. Anhand des Klebschichtverlaufs ist außerdem erkennbar, weshalb sich die Position der Lagen je nach Geometrie entlang der Klebschicht verschiebt. Die Klebschichtlänge im Bereich der 0° -Lagen ist beispielsweise bei der variablen Schäftungen deutlich länger als in der vergleichbaren konstanten Schäftungsgeometrie. Aus diesem Grund liegen beim Vergleich der Schubspannungen unterschiedlicher Geometrien über eine normierte Klebschichtlänge die Lagenbereiche nicht exakt übereinander.

In Abbildung 5.14 sind die über der mittleren Knotenreihe ausgewerteten VON-MISES-Spannungen für die Simulationen QI1-K-1 und QI1-V-1 bei einem zurückgelegten Weganteil von 40 % aufgetragen. Die x-Achse zeigt die normierte Klebschichtlänge. Eine genaue Positionierung der einzelnen Lagen auf der x-Achse ist aufgrund der mit der Schäftungswinkelvariation unterschiedlich ausfallenden Klebschichtgeometrie nicht möglich. Daher wird zum Vergleich eine normierte Klebschichtlänge verwendet. Deutlich ist zu erkennen, dass in zwei Bereichen der konstanten Schäftung bereits die maximale Spannung von ca. 76 MPa erreicht wird. Aufgrund des Lagenaufbaus ist darauf zu schließen, dass dies die doppelten 0° -Lagen sind. Das Spannungsniveau der variablen Schäftung liegt hingegen noch unter diesem Grenzwert. Auch bei dieser idealen Schäftungsgeometrie weisen die 0° -Lagen jedoch leicht erhöhte Spannungen auf. Die durchschnittliche VON-MISES-Spannung $\bar{\sigma}_v$ dieser Laststufe beträgt bei der konstanten Schäftung 59,54 MPa. Bei der variablen Schäftung ist diese mit 59,26 MPa nur geringfügig niedriger. Die Standardabweichung beträgt jedoch 16,11 MPa bei der konstanten und 8,7 MPa bei der variablen Schäftung. Dies zeigt, dass es möglich ist, den Spannungsverlauf durch eine variable Schäftungsgeometrie zu glätten.

⁴ In der Nomenklatur der Geometrien steht ein V für eine variable und ein K für eine konstante Schäftung.

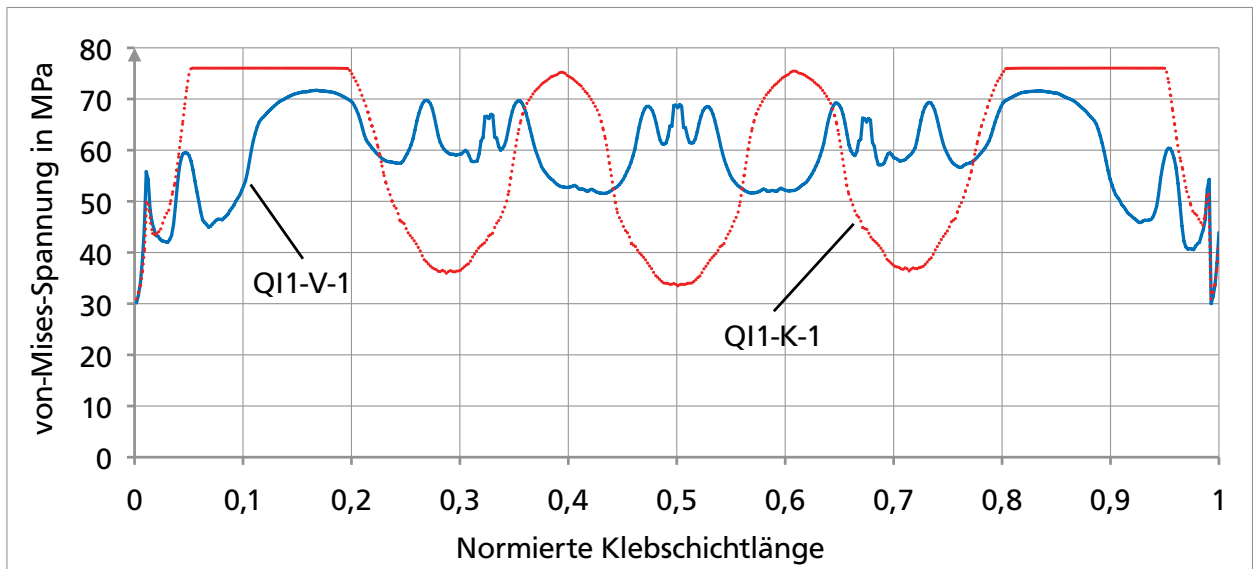


Abbildung 5.14: Vergleich des von-Mises-Spannungsverlaufs in der Klebschicht bei einem Weganteil von 40 % des Gesamtweges (Simulationen QI1-K-1 und QI1-V-1)

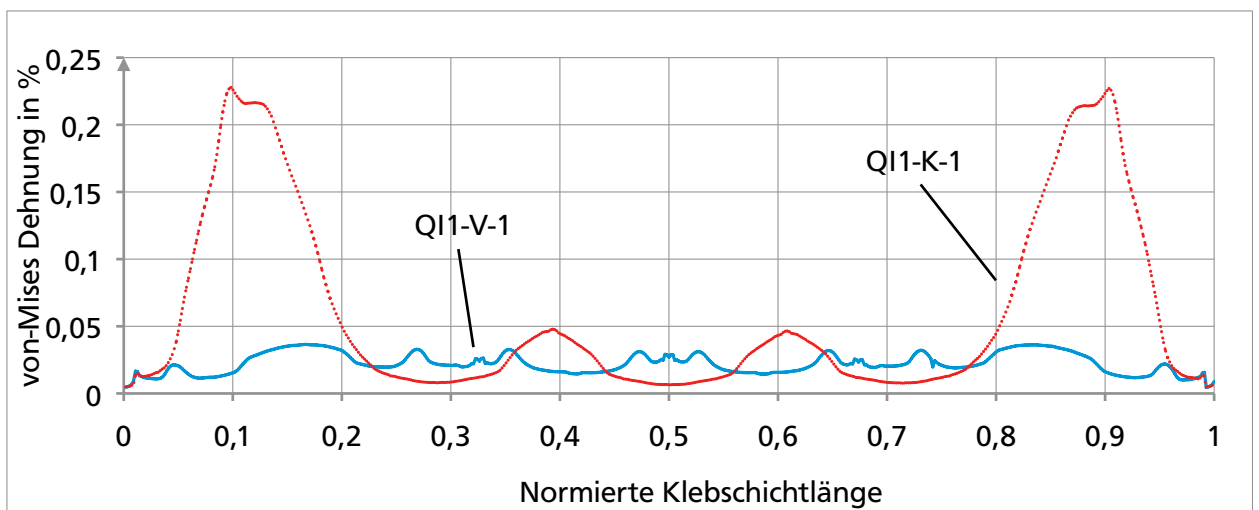


Abbildung 5.15: Vergleich der von-Mises-Dehnung in der Klebschicht bei einem Weganteil von 40 % des Gesamtweges (Simulationen QI1-K-1 und QI1-V-1)

Abbildung 5.15 zeigt für den gleichen Wegschritt (40 %) die von-Mises-Dehnung innerhalb der Klebschicht. Bei der konstanten Schäftung ist in den doppelten 0°-Lagen ein starker Ausschlag bis zu einem Maximum von 0,2 % erkennbar. Im Vergleich dazu bleibt die Dehnung der Klebstoffelemente bei der variablen Schäftung nahezu konstant und unter 0,05 %.

Aufgrund der geometrischen Forderung einer gleichmäßigen Klebschichtdicke reichen die Grenzschichten von Laminat und Klebstoff in die benachbarte Lage. Dies erzeugt möglicherweise die im Spannungsverlauf erkennbaren Spannungsspitzen. Um diese Annahme zu verifizieren ist in Abbildung 5.16 die genaue Position der einzelnen Lagen im Spannungsverlauf der Probe QI1-V-1 aufgetragen. Der zurückgelegte Weganteil beträgt 30 %. Deutlich ist zu erkennen, dass die Spannungsspitzen nahe den Lagenübergängen liegen. Der Großteil liegt dabei in den $\pm 45^\circ$ -Lagen. Eine genauere Analyse der Positionen an denen in der Klebschicht ein Knick vorherrscht, ist in Abbildung 5.17 dargestellt. Der innere Knick der Grenzschicht von Laminat zu Klebstoff liegt in der $\pm 45^\circ$ -Lage, der äußere Knick dagegen in der 0°-Lage. Da alle im Diagramm erkennbaren

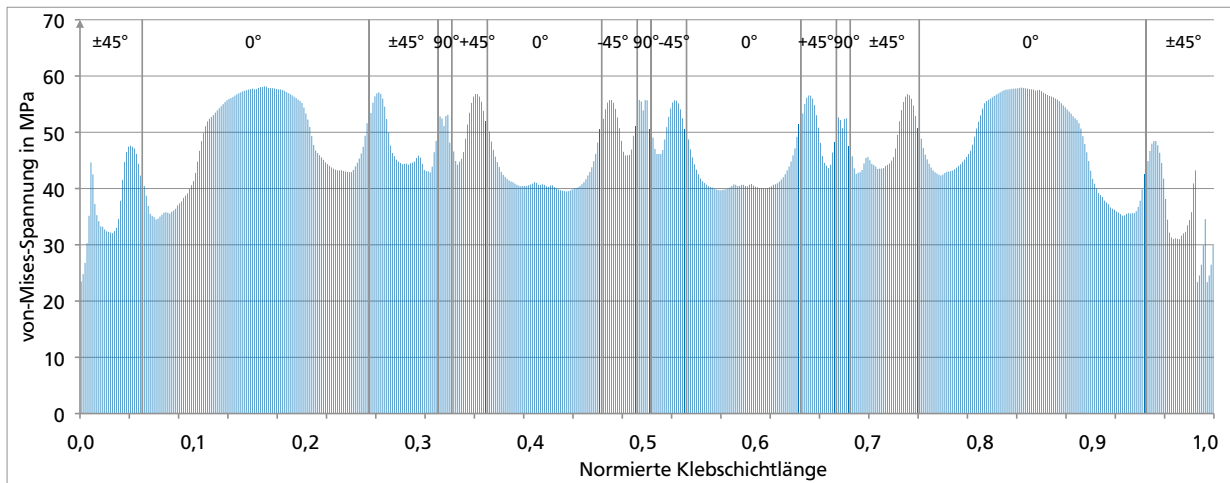


Abbildung 5.16: Position der Lagen mit unterschiedlicher Faserorientierung zum VON-MISES-Spannungsverlauf bei einem Weganteil von 30 % (Geometrie QI1-V-1)

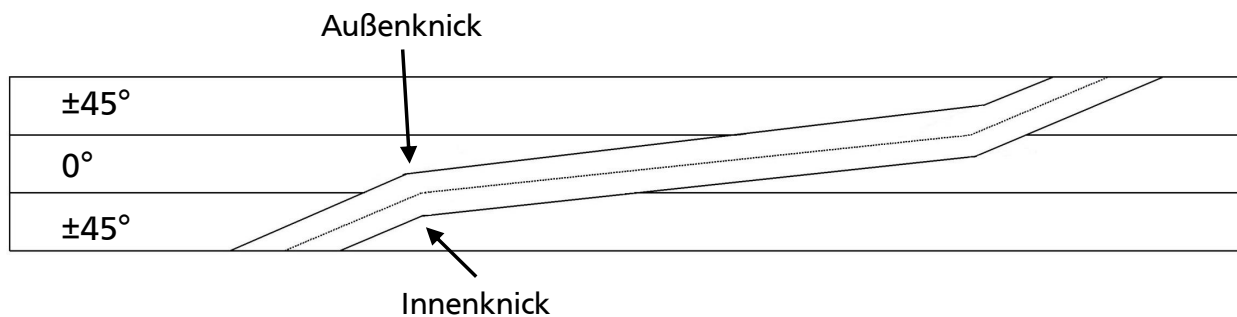
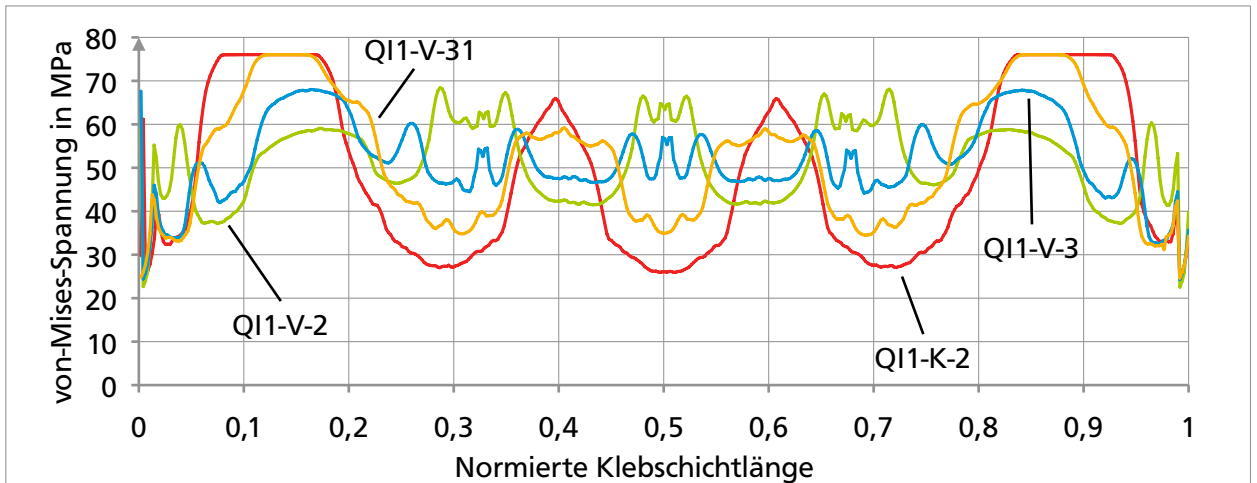


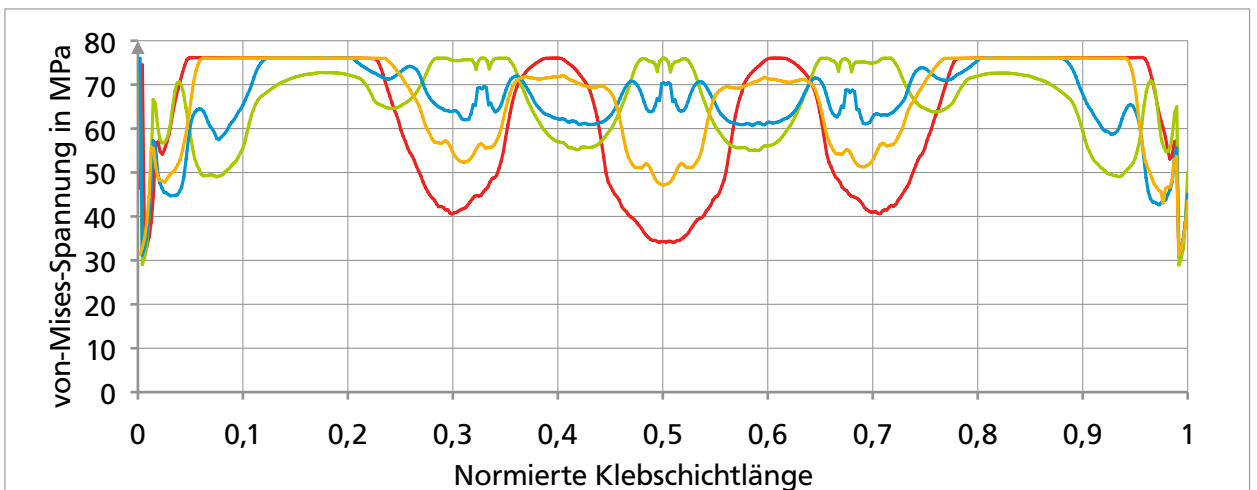
Abbildung 5.17: Prinzipskizze der Positionen der Innen- und Außenknicke innerhalb der Lagen

Spannungsspitzen in den $\pm 45^\circ$ -Lagen liegen, kann davon ausgegangen werden, dass die „Innenknicke“ eine größere Auswirkung auf die Schubspannung haben, als die „Außenknicke“. Die aufgrund der verschobenen Knickpunkte inkorrekten Schäftungswinkel erhöhen die Spannung um bis zu 20 MPa.

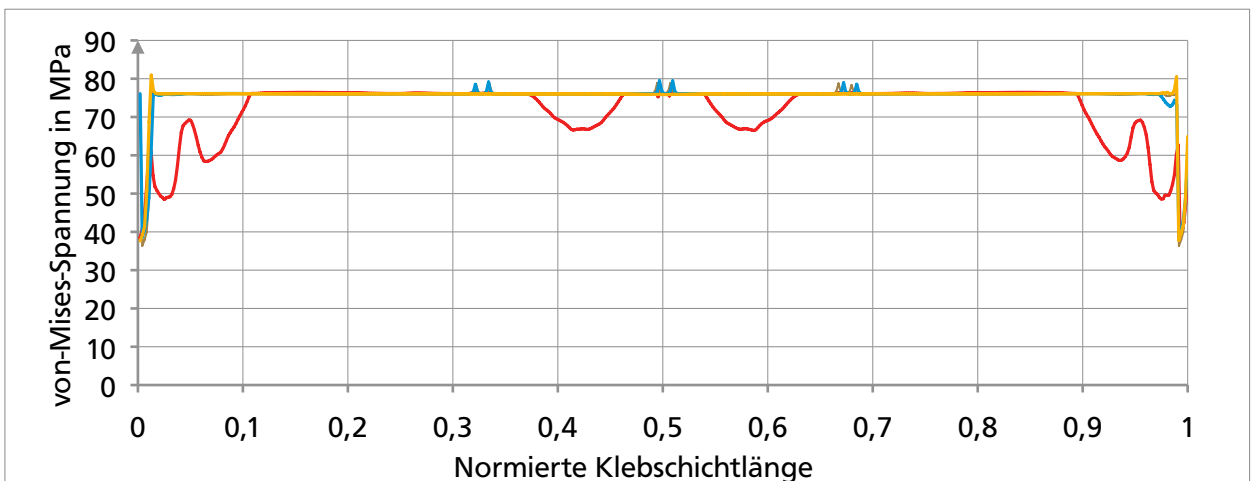
Abbildung 5.18 zeigt die Auswertung der VON-MISES-Spannungen über der normierten Klebschichtlänge für die Simulationen mit einer Reparaturlänge von 60 mm. Es sind drei verschiedene Wegschritte aufgetragen (30 %, 40 % und 55 %). Als Vergleich dient jeweils die konstante Schäftung QI1-K-2. Abbildung 5.18 (a) zeigt, dass die Schubspannung von QI1-K-2 (rot) bereits die Grenzspannung in den 0° -Lagen erreicht hat. Dies ist an den äußeren, abgeflachten Maxima zu erkennen. Auch einige Knoten in der Klebschicht der Simulation QI1-V-31 (orange) haben bereits die Grenzspannung erreicht. Wie erwartet, fallen die Spannungsspitzen aufgrund der gering gekrümmten Klebschichtgeometrie niedriger aus. Der Spannungsverlauf der Simulationen QI1-V-2 (grün) und QI1-V-3 (blau) liegt hingegen noch darunter. Außerdem ist zu erkennen, dass im Bereich der 0° -Lagen die Spannung von QI1-V-3 höher ist als die von Simulation QI1-V-2. Dies liegt an den zur Reparaturlängenreduktion angepassten Schäftungswinkeln. In den $\pm 45^\circ$ -Lagen ist dasselbe zu beobachten, wobei dort QI1-V-2 die höheren Spannungen aufweist. Bei einem zurückgelegten Weg von 40 % hat sich die Anzahl der Knoten mit einer gesättigten Spannung erhöht. Die Kurve von QI1-V-31 zeigt einen annähernd ähnlichen Verlauf wie die konstante Schäftung QI1-K-2. Auch Teile der Klebschicht von QI1-V-3 haben bereits die Grenzspannung erreicht. Der Verlauf von QI1-V-2 liegt hingegen größtenteils noch unter dieser Spannung. Nur im Bereich der $\pm 45^\circ$ -Lagen ist der Verlauf abgeflacht. Bei 55 % zurückgelegtem Gesamtweg liegen alle Spannungsverläufe der variablen



(a) 30 % Gesamtweg



(b) 40 % Gesamtweg



(c) 55 % Gesamtweg

Abbildung 5.18: Vergleich der von-Mises-Spannung der konstanten Schäftung QI1-K-2 (Reparaturlänge 60 mm) mit den drei Schäftungsgeometrien QI1-V-2, QI1-V-3 und QI1-V-31. Es sind drei verschiedene Wegschritte dargestellt.

Tabelle 5.4: Übersicht über die ermittelten Versagenslasten, Versagensspannungen und Bruchdehnungen für die Simulationen mit Laminataufbau QI1

Bezeichnung	Versagenslast	Versagensspannung	Bruchdehnung	Weganteil
Formelzeichen	F_{max}	σ_M	ε_{ult}	–
Einheit	kN	MPa	%	%
QI1-K-1	33,67	441,85	0,71	25,87
QI1-K-2	33,2	435,4	0,69	25,4
QI1-V-1	57,38	753,03	1,23	45,1
QI1-V-2	50,62	664,28	1,09	39,82
QI1-V-3	46,66	612,35	1,0	36,5
QI1-V-31	40,66	533,64	0,87	31,94
QI1-V-L	38,55	505,94	0,78	28,75

Schäftungen auf der Grenzspannung. Einige Bereiche der konstanten Schäftung haben diese noch nicht erreicht.

Neben den VON-MISES-Spannungen und -Dehnungen werden die Versagenslasten, Bruchdehnungen und Versagensspannungen der Simulationen nach dem in Abschnitt 5.1.3 beschriebenen Verfahren ausgewertet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.4 aufgetragen. Die konstanten Schäftungen weisen annähernd gleiche Versagenslasten auf. Die der Simulation QI1-K-1 liegt durch die größere Klebschichtfläche etwas höher (1,3 %). Die variable Schäftung mit Geometrie QI1-V-1 erreicht gegenüber der vergleichenden konstanten Schäftung QI1-K-1 eine um 41,3 % gesteigerte Zugfestigkeit. Im Gegensatz zur Probe mit Geometrie QI1-K-2 erreichen die Simulationen mit gleicher Reparaturlänge QI1-V-2 eine Festigkeitssteigerung um 34,4 %, die der Geometrie QI1-V-3 um 28,8 %. Es ist zu erkennen, dass QI1-V-2 bei höheren Lasten versagt als QI1-V-3. Der Grund hierfür ist das spätere Erreichen der Grenzspannung in den Knoten der Klebschicht. Daraus kann geschlossen werden, dass bei Lagenaufbau QI1 der Einfluss eines geänderten Schäftungswinkels auf die 0°-Lagen stärker ist als jener auf die ±45°-Lagen. Dabei hat die Änderung des Schäftungswinkels in den 0°-Lagen um 0,3° eine größere Auswirkung auf die Probenfestigkeit als eine Änderung in den ±45°-Lagen um 2,16°. Die Steigerung der Versagenslasten der Geometrie QI1-V-31 ist mit 18,3 % gering. Die Spannungsverläufe zeigen, dass die Knoten der Klebschicht trotz niedriger Spannungsspitzen vor den vergleichbaren Geometrien die Grenzspannung erreichen. Daraus lässt sich schließen, dass die Differenz der Schäftungswinkel und die damit verbundene Winkeländerung der Klebschicht keinen starken Einfluss auf die Zugfestigkeit der Proben hat.

Zusätzlich sind Tabelle 5.4 die Bruchdehnungen und der zurückgelegte Weganteil aufgeführt. Bezugnehmend auf die bereits in Abbildung 5.18 vorgestellten Spannungsverläufe ist festzustellen, dass Probe QI1-K-2 bei einem Weganteil von 30 % bereits versagt ist. Die virtuellen Proben mit einer variablen Schäftung sind bei dem gezeigten Diagramm mit einem Weganteil von 40 % ebenfalls bereits versagt.

Die Auswertung der Zugfestigkeit von QI1-V-L zeigt eine leichte Steigerung gegenüber der konstanten Schäftung (12,7 %). Diese fällt jedoch nicht im gleichen Maße wie bei den anderen Geometrien aus. Der Unterschied zu QI1-V-1 beträgt 32,8 %.

5.2.2 Simulationen mit Laminataufbau QI3

Um den Einfluss des Laminats zu analysieren, werden Simulationen mit Lagenaufbau QI3 durchgeführt. Dabei werden, bis auf QI1-V-31 und QI1-V-L, die zuvor aufgezeigten Geometrien übernommen. Tabelle 5.5 zeigt eine Übersicht über die durchgeführten Simulationen und die verwendeten Schäftungswinkel. Zunächst werden die Simulationen QI3-K-1 und QI3-V-1 miteinander verglichen. In Abbildung 5.19 und 5.20 sind die von-MISES -Spannungen und -Dehnungen für einen Weganteil von 40 % aufgetragen. Wie zuvor bei den Probekörpern mit Laminat QI1 weisen in den äußeren 0° -Lagen die ersten Knoten die Grenzspannung auf. Die Kurve QI3-V-1 liegt noch darunter. Die mittlere von-MISES -Spannung $\bar{\sigma}_v$ der konstanten Schäftung liegt bei 60,31 MPa, die der variablen Geometrie mit 59,89 MPa leicht darunter. Anhand der Standardabweichung lässt sich dennoch eine Glättung des von-MISES -Spannungsverlaufs feststellen. Bei der konstanten Schäftung beträgt diese 14,13 MPa, bei der variablen Schäftung 7,99 MPa. Generell fällt aufgrund des Lagenaufbaus der Unterschied im Spannungsverlauf gegenüber QI1 nicht in der selben Größe aus. Dies spiegelt sich auch im Verlauf der Dehnung wider (Abbildung 5.20). Die äußeren 0° -Lagen weisen bei der konstanten Schäftung mit 0,09 % die größte Dehnung auf. Die variable Schäftung erreicht Maxima von 0,05 %.

Tabelle 5.5: Übersicht über die variablen Schäftungssimulationen für den Laminataufbau QI3

Bezeichnung	Schäftungswinkel			Reparaturlänge L
	0° -Lage	$\pm 45^\circ$ -Lage	90° -Lage	
QI3-K-1 (CAIRE-IM7-3-TEN-D-RT-K-1)	$2,454^\circ$	$2,454^\circ$	$2,454^\circ$	70 mm
QI3-K-2 (CAIRE-IM7-3-TEN-D-RT-K-2)	$2,8624^\circ$	$2,8624^\circ$	$2,8624^\circ$	60 mm
QI3-V-1 (CAIRE-IM7-3-TEN-D-RT-V-1)	1°	$3,4^\circ$	$21,4^\circ$	70 mm
QI3-V-2 (CAIRE-IM7-3-TEN-D-RT-V-2)	1°	$5,65^\circ$	$21,4^\circ$	60 mm
QI3-V-3 (CAIRE-IM7-3-TEN-D-RT-V-3)	$1,3^\circ$	$3,4^\circ$	$21,4^\circ$	60 mm

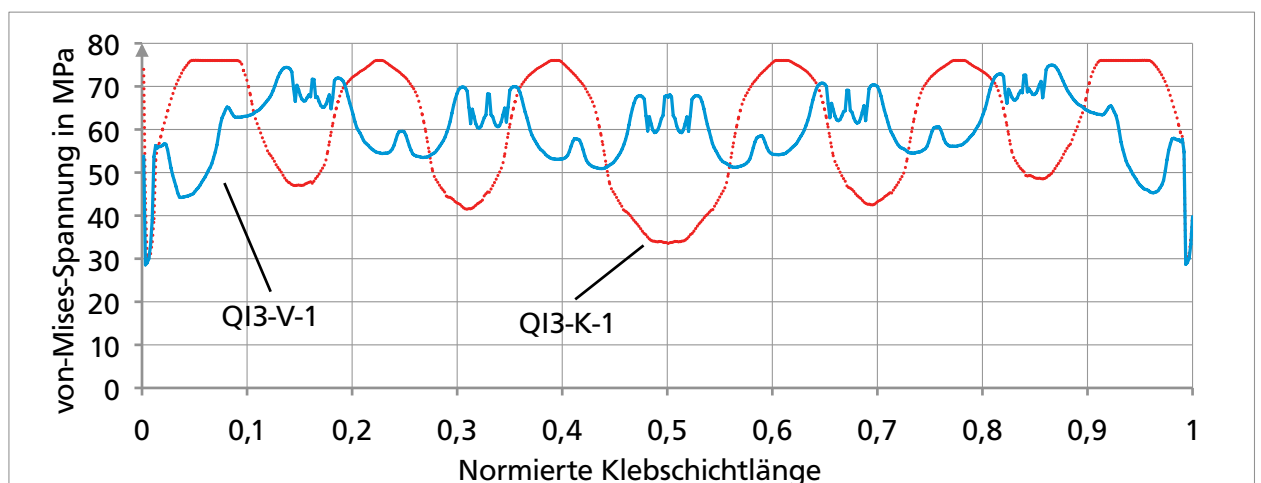


Abbildung 5.19: Vergleich des von-MISES -Spannungsverlaufs in der Klebschicht bei einem Weganteil von 40 % des Gesamtweges (Simulationen QI3-K-1 und QI3-V-1)

Wie bei Laminataufbau QI1 werden die von-MISES -Spannungen für die Proben mit einer Reparaturlänge von 60 mm ausgewertet und mit dem Verlauf der konstanten Schäftung QI3-K-2 verglichen.

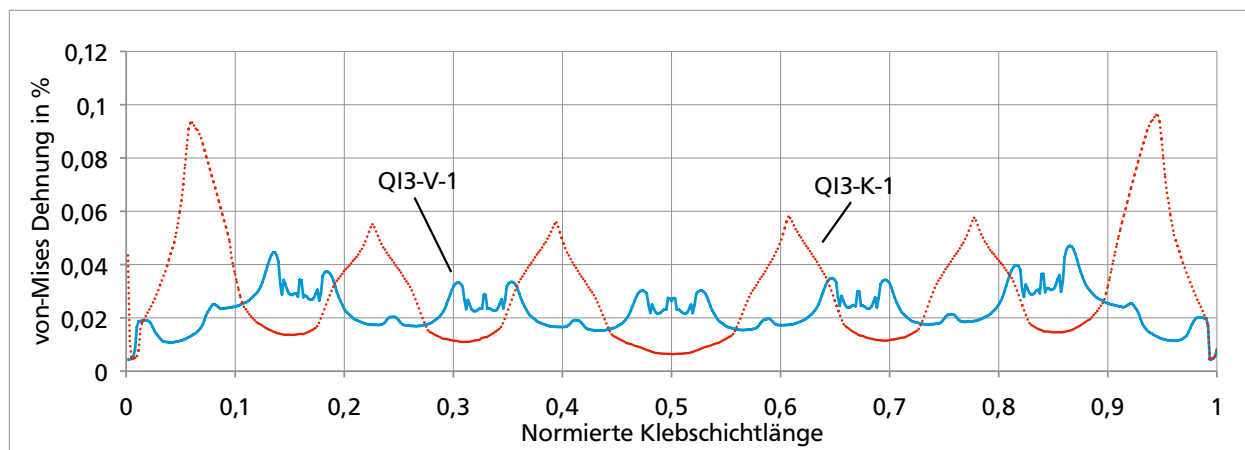


Abbildung 5.20: Vergleich der von-Mises-Dehnung in der Klebschicht bei einem Weganteil von 40 % des Gesamtweges (Simulationen QI3-K-1 und QI3-V-1)

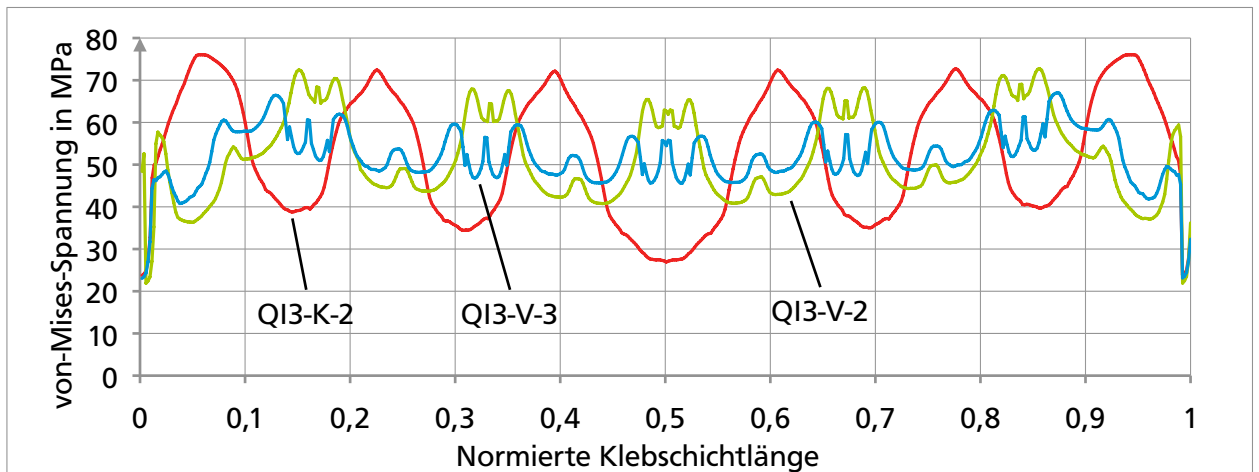
In Abbildung 5.21 (a) ist zu erkennen, dass bei 30 % zurückgelegten Weges in keiner Probe die Grenzspannung erreicht ist. Deutlich sind sechs Maxima im Bereich der 0° -Lagen bei der konstanten Schäftung QI3-K-2 zu erkennen. Die in den $\pm 45^\circ$ - und 90° -Lagen liegenden fünf Spannungsmaxima des Verlaufs von QI3-V-2 erreichen annähernd die Werte der Maxima von QI3-K-2. Bei 40 % zurückgelegten Weges (Abbildung 5.21 (b)) weisen alle Verläufe Bereiche mit erreichter Grenzspannung auf. Der Verlauf von QI3-V-3 zeigt dabei das niedrigste Spannungsniveau. Bei 55 % des zurückgelegten Weges (Abbildung 5.21 (c)) haben alle Knoten der Klebschichten die Grenzspannung erreicht. Die Kurve beschreibt annähernd eine Konstante mit einem Wert von $\sigma_v = 76$ MPa.

Das Ergebnis der Auswertung der Versagenslasten, -spannungen und Bruchdehnungen ist in Tabelle 5.6 aufgeführt. Im Unterschied zu Laminat QI1 zeigt sich eine deutliche Differenz bei den Versagenslasten der konstanten Schäftungen mit unterschiedlicher Reparaturlänge. Die der Simulation QI3-K-1 liegt im Gegensatz zu QI3-K-2 um 11 % höher. QI3-V-1 erreicht im Gegensatz zu QI3-K-1 eine um 10,9 % höhere Zugfestigkeit. Im Vergleich zur konstanten Schäftung QI3-K-2 zeigen die variablen Geometrien QI3-V-2 eine um 9,4 % und QI3-V-3 um 12 % erhöhte Zugfestigkeit.

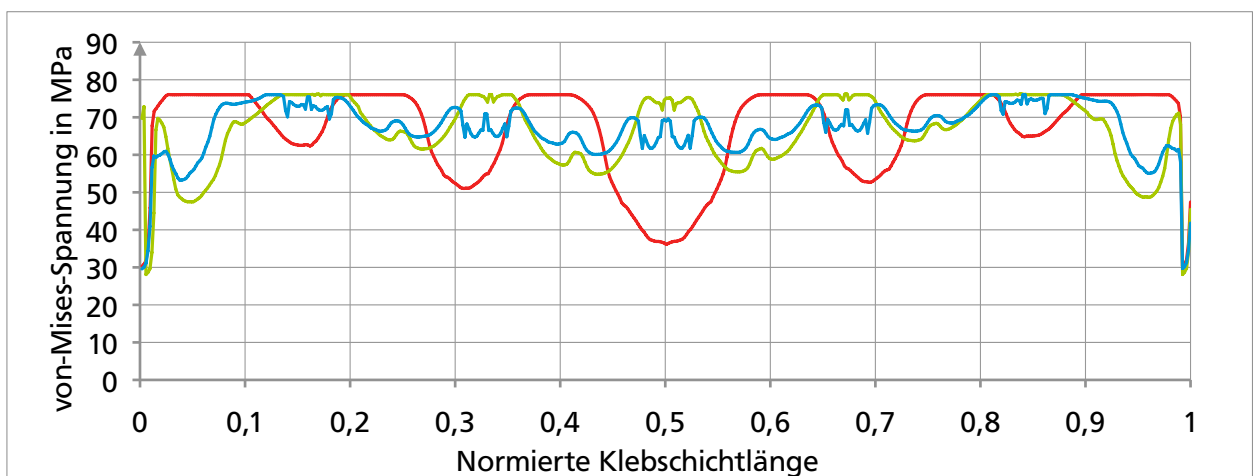
Bei den in Abbildung 5.21 (a) gezeigten Spannungsverläufen für einen Weganteil von 30 % sind alle Proben noch intakt. Bei 40 % (Abbildung 5.21 (b)) sind alle Proben bereits versagt.

Tabelle 5.6: Übersicht über die ermittelten Versagenslasten, Versagensspannungen und Bruchdehnungen für die Simulationen mit Laminataufbau QI3

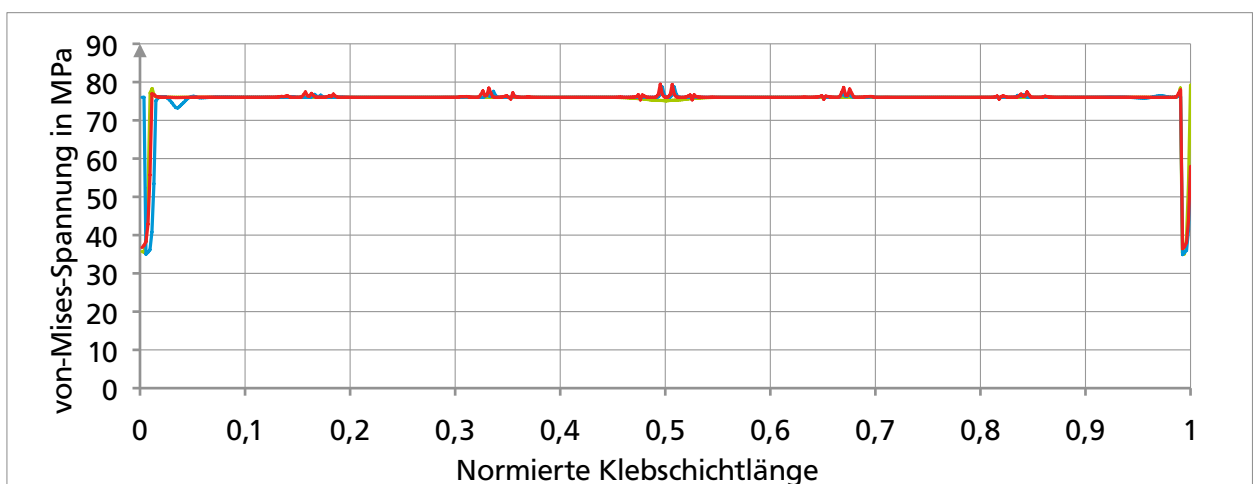
Bezeichnung	Versagenslast	Versagensspannung	Bruchdehnung	Weganteil
Formelzeichen	F_{max}	σ_M	ϵ_{ult}	–
Einheit	kN	MPa	%	%
QI3-K-1	50,63	664,49	0,96	35,35
QI3-K-2	45,04	591,12	0,85	31,1
QI3-V-1	56,85	746,0	1,1	40,28
QI3-V-2	49,74	652,77	0,97	35,49
QI3-V-3	51,22	672,22	0,99	36,19



(a) 30 % Gesamtweg



(b) 40 % Gesamtweg



(c) 55 % Gesamtweg

Abbildung 5.21: Vergleich der VON-MISES-Spannung der konstanten Schäftung QI3-K-2 (Reparaturlänge 60 mm) mit den zwei Schäftungsgeometrien QI3-V-2 und QI3-V-3. Es sind drei verschiedene Wegschritte dargestellt.

5.2.3 Manuell angepasster Schäftungswinkel

Basierend auf den zuvor ausgewerteten Spannungsverläufen wird eine variable Schäftungsgeometrie mit individuell angepassten Schäftungswinkeln definiert. Dazu werden die Winkel, unabhängig von der Faserorientierung, jeweils manuell an den Spannungszustand angepasst. In Tabelle 5.7 sind die durchgeführten Simulationen mit den entsprechenden Winkeln aufgezeigt. Da das Laminat eine Symmetrie um die Mittelachse aufweist, wird aus Gründen der Übersichtlichkeit nur die Hälfte des Laminataufbaus aufgeführt. Die jeweils zur vorherigen Simulation angepassten Schäftungswinkel sind fett markiert.

Tabelle 5.7: Übersicht über die Simulationen für eine individuell optimierte Schäftungsgeometrie. Aufgeführt ist der halbe Laminataufbau mit entsprechender Faserorientierung und den einzelnen, lagenunabhängigen Schäftungswinkeln. Die im Rahmen der Optimierung zur vorherigen Simulation veränderten Winkel sind fett hervorgehoben. Die Einheit der aufgeführten Werte ist Grad.

Bezeichnung	45	-45	0	0	45	-45	90	90	45	0	-45	90
QI1-V-41	7,4	3,4	2,2	1	3,4	3,4	22	10	3,4	1	3,4	22
QI1-V-42	7,4	3,4	1,3	1	3,4	3,4	10	10	3,4	2,2	3,4	10
QI1-V-43	7,4	3,4	1,3	1	3,4	3,4	22	22	3,4	1,4	3,4	22
QI1-V-44	7,4	3,4	1	1	4,5	4,5	22	22	4,5	1,4	4,5	22
QI1-V-45	10	7,4	1	1	3,5	3,5	22	22	3,5	1,4	3,5	22

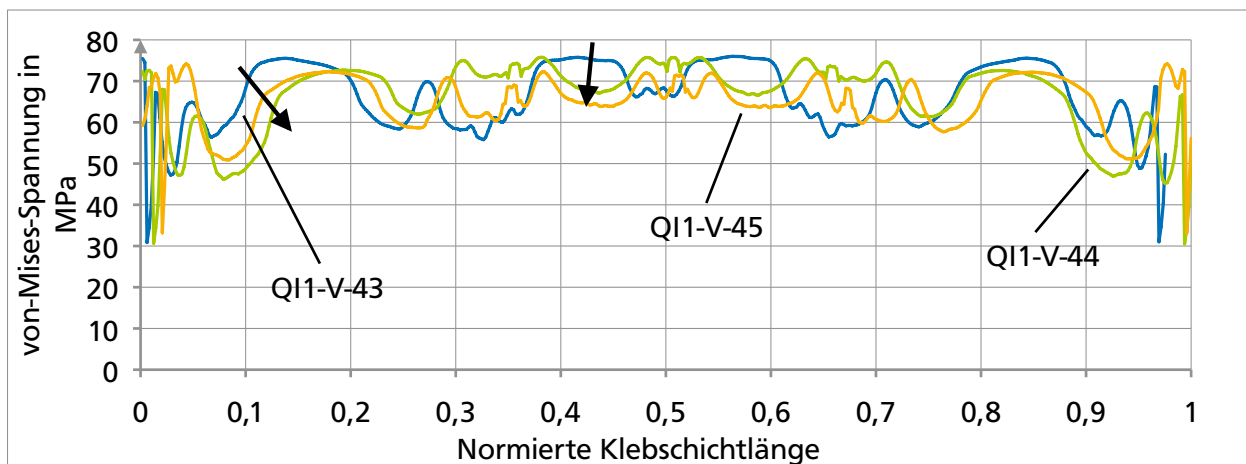


Abbildung 5.22: Vergleich des von-Mises-Spannungsverlaufs in der Klebschicht für die individuell optimierte Schäftung bei einem zurückgelegten Weg von 40 % des Gesamtweges. Die Pfeile beschreiben die Bereiche, in denen der Spannungsverlauf gesenkt wird.

Ausgehend von den Geometrien QI1-V-2 und QI1-V-3 wird durch individuelle Winkelanpassung das Spannungsniveau angeglichen. In einem ersten Schritt werden beispielsweise die Schäftungswinkel der randnahen $\pm 45^\circ$ -Lagen auf $7,4^\circ$ erhöht, da in diesem Bereich ein niedriges Spannungsniveau erkennbar ist. Um die Reparaturlänge $L = 60$ mm zu erhalten müssen die Schäftungswinkel in den 90° -Lagen auf 10° gesenkt werden. In Abbildung 5.22 wird das Vorgehen anhand der letzten drei Simulationen (Bezeichnung: QI1-V-43 bis QI1-V-45) dargestellt. Es ist erkennbar, dass die im von-Mises-Spannungsverlauf der Simulation QI1-V-43 die 0° -Lagen im Gegensatz zu den restlichen Lagen höhere Werte aufweisen. Daher wird bei der folgenden Simulation QI1-V-44 der Winkel der

Tabelle 5.8: Übersicht über die aus den Simulationen zur manuell optimierten Schäftungsgeometrie ermittelten Versagenslasten, Versagensspannungen und Bruchdehnungen

Bezeichnung	Versagenslast	Versagensspannung	Bruchdehnung	Weganteil
Formelzeichen	F_{max}	σ_M	ϵ_{ult}	–
Einheit	kN	MPa	%	%
QI1-V-41	45,49	596,94	0,97	35,66
QI1-V-42	51,32	673,55	1,09	40,03
QI1-V-43	51,97	681,96	1,11	40,57
QI1-V-44	51,31	594,93	1,1	40,26
QI1-V-44	53,27	673,32	1,14	41,67

äußeren 0°-Lage von 1,3 auf 1° gesenkt. Um die Last besser zu verteilen und die Reparaturlänge zu erhalten, werden die inneren $\pm 45^\circ$ -Lagen gleichzeitig von 3,4° auf 4,5° erhöht. Die Auswertung der Simulation zeigt eine Senkung der Spannungen im Bereich der äußeren und inneren 0°-Lagen (schwarze Pfeile); gleichzeitig steigt jedoch die Spannung in zwei Bereichen zwischen 30-40 % und 60-70 % der Klebschichtlänge. Daher werden diese $\pm 45^\circ$ -Lagen- Schäftungswinkel in der abschließenden Simulation QI1-V-45 nochmals verringert. Die zusätzliche Reparaturlänge wird durch eine Erhöhung der Schäftungswinkel in den äußeren $\pm 45^\circ$ -Lagen ausgeglichen. Das VON-MISES-Spannungsniveau kann somit nochmals gesenkt werden.

In Tabelle 5.8 sind die Ergebnisse der Versagensauswertung aufgeführt. Entsprechend den Spannungsverläufen konnte die Versagenskraft mit jedem Schritt (Ausnahme QI1-V-44) gesteigert werden. Simulation QI1-V-45 erreicht eine um 4,9 % höhere Versagenskraft als Geometrie QI1-V-2. Mit einer manuellen Anpassung der Schäftungswinkel anhand des zuvor ermittelten Spannungsverlaufs ist die Steigerung der Zugfestigkeit möglich. Allerdings erzeugt die dadurch entstehende, komplizierte Geometrie einen zusätzlichen Fertigungsaufwand.

5.2.4 Verkürzte Reparaturlänge

Wie bereits beschrieben, ist davon auszugehen, dass variable Schäftungsgeometrien bei Erzielen der gleichen Zugfestigkeit eine Verkürzung der Reparaturlänge ermöglichen. Zur Bestätigung dieser Annahme werden in den Simulationen die Schäftungswinkel der Lagen schrittweise erhöht. Ziel der Optimierung ist eine Geometrie, bei welcher die Versagensspannung annähernd den Wert einer vergleichbaren 1:20-Schäftung aufweist.

Tabelle 5.9: Die aus den Simulationen zur verkürzten Schäftungsgeometrie ermittelten Versagenslasten, Versagensspannungen und Bruchdehnungen mit den entsprechend verwendeten Schäftungswinkeln

Bezeichnung	0°-Lage	$\pm 45^\circ$ -Lage	90°-Lage	Länge	Versagenslast	Versagensspannung	Bruchdehnung
Formelzeichen	θ_0	$\theta_{\pm 45}$	θ_{90}	L	F_{max}	σ_M	ϵ_{ult}
Einheit	Grad	Grad	Grad	mm	kN	MPa	%
QI3-K-2	2,8624	2,8624	2,8624	60	33,2	435,4	0,85
QI1-V-51	1,3	5,65	22	50	45,33	594,93	0,99
QI1-V-52	2	5,65	22	38,5	32,6	427,78	0,7

Eine Übersicht über die für Laminataufbau QI1 durchgeführten Simulationen mit den ausgewerteten Ergebnisse zeigt Tabelle 5.9. In Abbildung 5.23 sind die Geometrien der verkürzten Schäftungen als Seitenansicht dargestellt. Für eine Verkürzung der Reparaturlänge L werden in einem ersten Schritt die steileren Winkel der Geometrien QI1-V-2 und V-3 kombiniert, d.h. die Schäftungswinkel der 0°-Lagen auf 1,3° und die der $\pm 45^\circ$ -Lagen auf 5,65° erhöht. Dabei sinkt die Versagenslast auf das Niveau von QI1-V-3 (594,93 MPa), allerdings bei einer um 10 mm verkürzten Reparaturlänge. Auch daraus lässt sich schließen, dass der Schäftungswinkel in den 0°-Lagen einen größeren Einfluss auf die Zugfestigkeit hat, als die der $\pm 45^\circ$ -Lagen. Für eine weitere Simulation werden die 0°-Lagen mit einem größeren Schäftungswinkel von 2° versehen. Eine gleichzeitige Erhöhung des Winkels der $\pm 45^\circ$ -Lagen erscheint nicht sinnvoll, da die zusätzlich eingesparte Reparaturlänge klein bleibt. Die Auswertung zeigt, dass Simulation QI1-V-52, bei einer Verkürzung der Reparaturlänge um L = 21,5 mm auf 38,5 mm (-35,8 %), in etwa die Versagensspannung der konstanten 1:20-Schäftung aufweist (Abweichung 1,75 %). Dieses Simulationsergebnis bestätigt die Möglichkeit verkürzter Reparaturen durch variable Schäftungen.

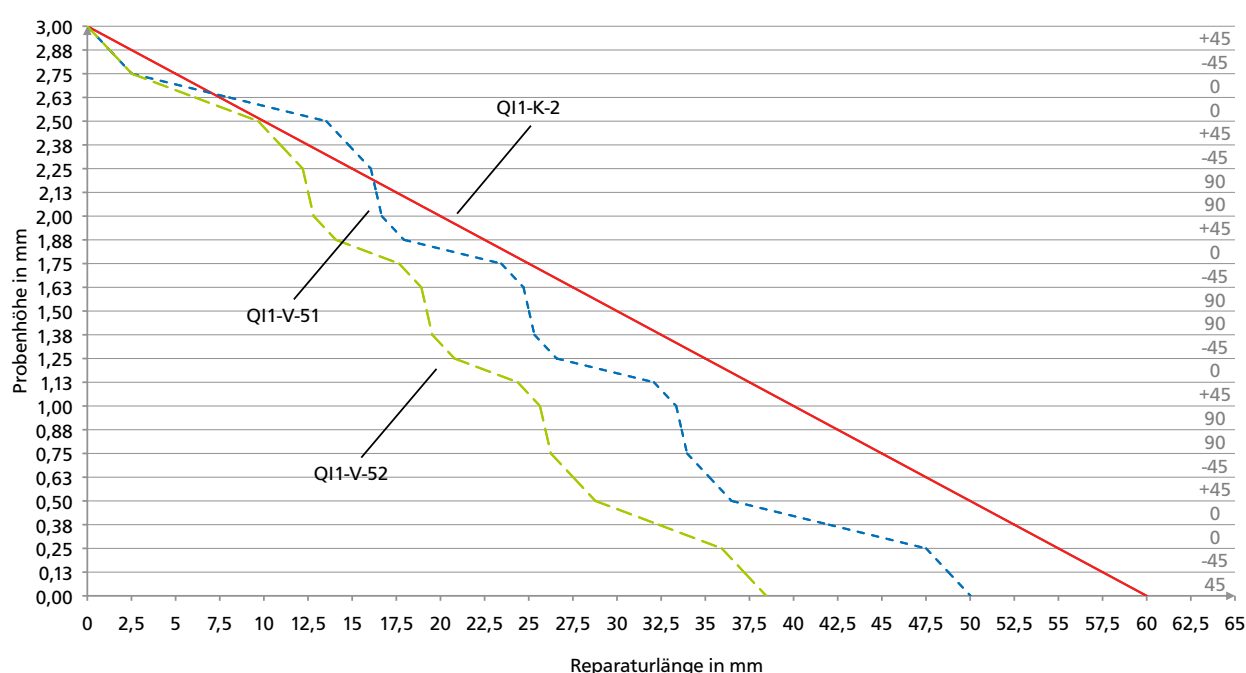


Abbildung 5.23: Vergleich der Geometrien der Schäftungen mit einer verkürzten Reparaturlänge

5.2.5 Simulation von ETD-Prüfbedingungen

Für die Simulation bei ETD-Prüfbedingungen (100 °C Prüftemperatur) werden die in Abschnitt 4.2 und 4.2.2 aufgeführten Materialparameter in die .bdf-Dateien der Probengeometrien QI1-V-1 und QI1-K-1 eingefügt. Wie bereits erwähnt werden, neben den eigentlichen Simulationen mit Werkstoffwerten für die ETD-Umgebung, Vergleichssimulationen mit den in [Mar11] aufgeführten Werten für RTD-Umgebung durchgeführt. Tabelle 5.10 zeigt eine Übersicht über die vier FE-Simulationen mit den jeweiligen Versagensdaten. Da die für RTD-Bedingung angenommenen Werkstoffkennwerte in QI1-RT-K-1 und QI1-RT-V-1 niedriger liegen als in den zuvor durchgeführten Simulationen, sind auch die Versagensspannungen niedriger. Bei den konstanten Schäftungen (Bezeichnung: QI1-100-K-1) sinkt der Wert von 442,38 MPa um 8,3 % auf 411,48 MPa. Bei der variablen Schäftung (Bezeichnung: QI1-100-V-1) beträgt der Unterschied 5,6 % (von 765,08 MPa auf 722,19 MPa).

Tabelle 5.10: Übersicht über die aus der Simulation mit ETD-Bedingungen ermittelten Versagenslasten, Versagensspannungen und Bruchdehnungen

Bezeichnung	Versagenslast	Versagensspannung	Bruchdehnung
Formelzeichen	F_{max}	σ_M	ε_{ult}
Einheit	kN	MPa	%
QI1-RT-K-1 (CAIRE-IM7-1-TEN-D-RT-K-1)	30,86	405,0	0,72
QI1-100-K-1 (CAIRE-IM7-1-TEN-D-100-K-1)	18,11	237,69	0,47
QI1-RT-V-1 (CAIRE-IM7-1-TEN-D-RT-V-1)	54,16	710,82	1,26
QI1-100-V-1 (CAIRE-IM7-1-TEN-D-100-V-1)	33,61	441,06	0,85

Für die Simulation bei ETD-Bedingungen sinkt die Versagenslast bei der konstanten Schäftung um 41,3 %. Bei der variablen Schäftung ist dieser Wert um 38 % niedriger. Aus den numerischen Daten lässt sich schlussfolgern, dass die variable Schäftung die durch die höhere Umgebungstemperatur herabgesetzte Klebstofffestigkeit in einem geringen Maße abfangen kann.

5.3 Vergleich und Zusammenfassung

In der numerischen Untersuchung wurden zunächst verschiedene Einflüsse auf die Klebschichtspannung und die Festigkeit variabler Schäftungen analysiert. Im Allgemeinen kann gezeigt werden, dass sich die Zugfestigkeit der Proben mit variabler Schäftung im Gegensatz zu konstanten Schäftungen erhöht. Dabei gelingt es, das Spannungsniveau in der Klebschicht zu glätten und Spannungsspitzen abzubauen, sodass Versagen bei einer größeren Probendehnung einsetzt.

Abbildung 5.24 zeigt eine Übersicht über die in der Simulation ermittelten Versagensspannungen der ausgewählten Schäftungsgeometrien miteinander. Aus den dargestellten Probengeometrien werden in der folgenden experimentellen Untersuchung Couponproben gefertigt und in einem Zugversuch geprüft. Aufgrund des Fertigungsaufwands muss die Anzahl der Probensätze auf 14 begrenzt werden. Bei den hier gezeigten Bezeichnungen für QI1-V-4 und QI1-V-5 handelt es sich um die in der Simulation als QI1-V-45 und QI1-V-52 bezeichneten Geometrien. Zur Vereinfachung werden die Endziffern für das Couponprobenprogramm entfernt.

Bei den Proben mit Laminataufbau QI1 wird ein Großteil der Last über die doppelten 0°-Lagen übertragen. Dadurch erfährt die Klebschicht an zwei Stellen eine besonders starke Dehnung. Dementsprechend versagen die konstanten QI1-Proben früher als jene mit Laminataufbau QI3. Das Potential einer variablen Schäftungsgeometrie ist daher für QI1 besonders groß. Die Probe QI1-V-1 erreicht eine um 41,3 % gesteigerte Festigkeit im Vergleich zur konstanten Schäftung QI1-K-1. Für die gleichen Winkel besteht die Steigerung bei QI3 nur 10,9 %. Ein ähnlicher Effekt ist bei den Proben mit einer Reparaturlänge von $L = 60$ mm zu erkennen. Für QI1 liegt die Steigerung bei 34,4 % bei einem Vergleich von QI1-K-2 (435,67 MPa) zu QI1-V-2 (664,28 MPa). Dagegen steigert sich die Festigkeit bei Probe QI3-V-3 (672,22 MPa) im Gegensatz zu QI3-K-2 (591,12) nur um 12,06 %. Der Schäftungswinkeleinfluss der 0°- und $\pm 45^\circ$ -Lagen ist dabei ebenfalls vom Laminataufbau abhängig. Dies zeigt der Vergleich der Proben mit der Endung -V-2 und -V-3. Für QI1 hat eine Erhöhung der Schäftungswinkel in den 0°-Lagen (QI1-V-3) eine Senkung der Versagensspannung (im Gegensatz zu QI1-V-2) zur Folge. Bei den Proben mit Laminataufbau QI3 erhöht diese Maßnahme hingegen die Zugfestigkeit. In der folgenden experimentellen Untersuchung werden für Lagenaufbau QI1 die konstanten Schäftungen QI1-K-1 und QI1-K-2 in einem Zugversuch geprüft. Hinzu kommen die Geometrien QI1-V-1, QI1-V-2 und QI1-V-3. Zur Überprüfung der durchgeführten Simulation wird

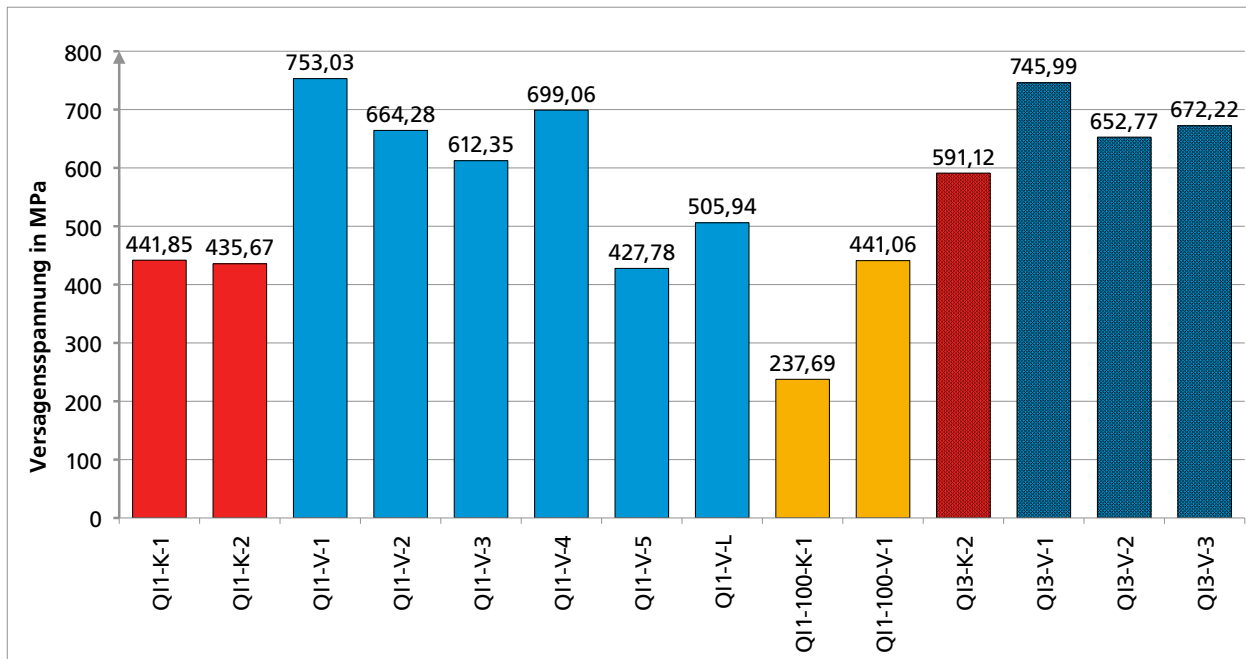


Abbildung 5.24: Vergleich der Versagensspannungen der für das Probenprogramm verwendeten Simulationen

auch ein Probensatz mit Geometrie QI1-V-L geprüft. Für Lagenaufbau QI3 werden Probensätze mit der konstanten Schäftung QI3-K-2 und den drei variablen Schäftungsgeometrien QI3-V-1, QI3-V-2 und QI3-V-3 erstellt.

Des Weiteren wurde gezeigt, dass durch eine individuelle Anpassung einzelner Schäftungswinkel nach Analyse der in der Klebschicht vorherrschenden VON-MISES-Spannung eine zusätzliche Festigkeitssteigerung möglich ist. Dabei ist für QI1-V-45 (699,06 MPa) eine Erhöhung gegenüber QI1-V-2 (664,28 MPa) um 4,9 % möglich und gegenüber QI1-K-2 (435,67 MPa) um 37,68 %. Auch diese Geometrie wird für die experimentelle Untersuchung herangezogen.

Auch die Verkürzung der Reparaturlänge durch Auslegung einer variablen Schäftung konnte gezeigt werden. Dabei wurde die Versagensspannung auf das Niveau einer vergleichbaren konstanten Schäftung reduziert. Die Reparaturlänge verkürzt sich gleichzeitig um mehr als 35 %. Die erzeugte Geometrie QI1-V-52 wird im experimentellen Zugversuch überprüft.

Die durchgeführten Simulationen mit ETD-Bedingungen zeigten, dass die Auswirkung erhöhter Prüftemperatur auf einen Probenkörper mit einer variablen Schäftung geringer ist als eine vergleichbare konstante Schäftung.

6 Experimentelle Untersuchung

In diesem Kapitel wird die experimentelle Untersuchung der Couponproben mit winkelvariabler Schäftung beschrieben. Zuerst werden die erforderlichen Voruntersuchungen, das Probenprogramm und die Probenfertigung vorgestellt. Anschließend wird auf die Qualität der gefertigten Couponproben eingegangen. Im letzten Abschnitt werden die Ergebnisse der Zugversuche vorgestellt und miteinander verglichen.

6.1 Voruntersuchungen

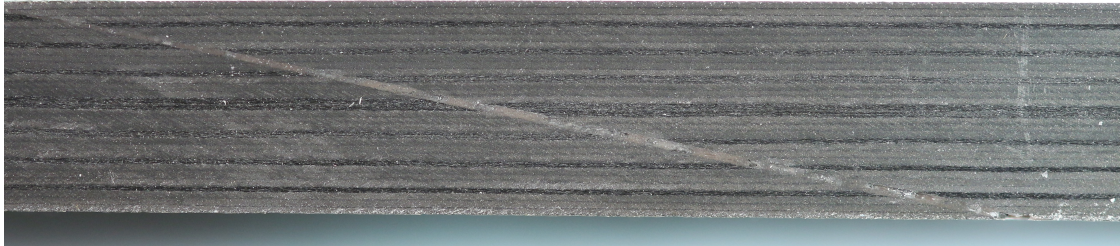
Da eine gute Couponprobenqualität für die erfolgreiche Durchführung der Zugversuche essentiell ist, wurden Voruntersuchungen der Einflussfaktoren auf die Klebschichtqualität durchgeführt. Des Weiteren war es notwendig, die Möglichkeiten einer korrekten Erwärmung der Proben für die Versuche bei ETD-Bedingungen zu prüfen.

6.1.1 Klebschichtqualität

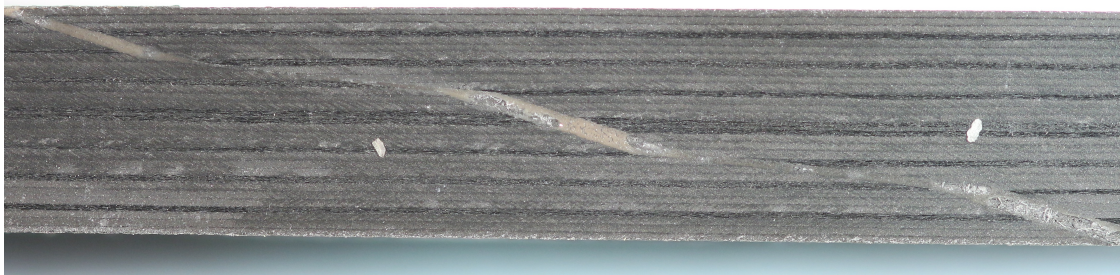
Vor der in dieser Arbeit durchgeführten experimentellen Untersuchung mit lagenvariablen Schäftungswinkeln wurden einfache Couponproben hergestellt, um die Fertigungsmöglichkeiten und -einflüsse zu untersuchen. Ziel war es, den Einfluss der Parameter Klebschichtdicke, Schäftungsgeometrie und benutztes Vakuum zum Verkleben der Proben zu analysieren. Die gefertigten Proben wurden anschließend mithilfe eines Mikroskops untersucht. Insgesamt wurden 9 Proben mit drei verschiedenen Schäftungsgeometrien und jeweils unterschiedlichen Klebschichtdicken hergestellt. Die Geometrien entsprechen den in Abbildung 4.7 gezeigten Anordnungen mit einem konstanten Schäftungswinkel (a), einem variablen Schäftungswinkel mit unterschiedlicher Klebschichtdicke (b) und einem variablen Schäftungswinkel mit einer konstanten Klebschichtdicke (d). Die hierfür verwendeten Schäftungswinkel wurden willkürlich gewählt. Die Proben mit variablen Winkeln weisen an vier Stellen Winkeländerungen unter der Verwendung von zwei verschiedenen Schäftungswinkeln auf. Die Klebschichtdicke wurde mithilfe seitlich angebrachter Stahlstifte auf 0,13 mm, 0,2 mm oder 0,3 mm eingestellt. Durch diese Fixierung wird ein Auseinandergleiten der Probenhälften während der Fertigung verhindert. Zusätzlich wurden drei Proben mit den genannten Geometrien und einer Klebschichtdicke von 0,13 mm hergestellt, bei denen zur Kompaktierung der Schäftung für die Verklebung mithilfe eines Vakuumaufbaus nicht das übliche Feinvakuum, sondern Hausvakuum¹ verwendet wurde. Diese Maßnahme dient der Überprüfung von Strukturklebungen mit nur 1 bar Anpressdruck (statt mit den üblichen 3 bar). Als Klebstoff diente ebenfalls ein Epoxy-Filmklebstoff *HYSOL EA 9695 K*. Dieser unterscheidet sich von dem in Abschnitt 4.2.2 vorgestellten Typ durch ein Gewebe als Stützmaterial (statt Vlies). Zum Mikroskopieren wurden die Proben nach dem Fertigen mit einer Diamantsäge in Längsrichtung zertrennt. Ein Anschleifen der Schnittfläche war nicht erforderlich, da die Klebschicht und die Einzellagen unter dem Mikroskop gut zu erkennen waren. Auf den detaillierten Fertigungsprozess von Couponproben soll hier nicht eingegangen werden, da dies ausführlich in Abschnitt 6.3 erläutert wird. Eine hochauflösende Aufnahme jeder Schäftungsgeometrie zeigt Abbildung 6.1. Deutlich sind die verschiedenen Lagen und Klebschichtgeometrien zu erkennen. Auch die Aufdickung der Klebschicht bei Schäftungsgeometrie (b) ist gut erkennbar.

¹ Hausvakuum ist ein zentrales Vakuumsystem in der Fertigung des *Instituts für Faserverbundleichtbau und Adaptronik*. Dieses System dient vor allem der Evakuierung von Bauteilen mit großem Volumenstrom, erreicht jedoch für die meisten Bauteile nicht den geforderten Vakuumdruck.

Bei allen in dieser Arbeit durchgeführten mikroskopischen Untersuchungen kommt ein digitales Mikroskop der Marke Keyence VHX-1000 zum Einsatz. Als Objektiv dient das Universal-Zoomobjektiv VH-Z100UR. Dieses ermöglicht eine 100- bis 1000-fache Vergrößerung. Mithilfe der integrierten Software ist es möglich, Distanz- und Winkelmessungen direkt auf den erzeugten Bildern vorzunehmen. Außerdem besteht die Möglichkeit, ein aus einzelnen Fotos zusammengesetztes Gesamtbild zu erzeugen, und somit große Messbereiche zu untersuchen.



(a) Konstante Schäftung



(b) Variable Schäftung mit variabler Klebschicht

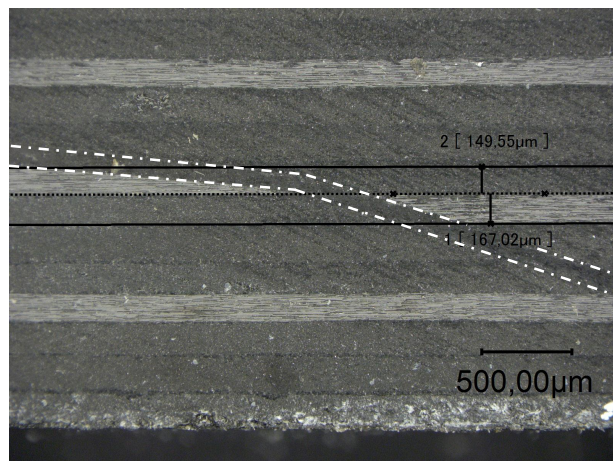


(c) Variable Schäftung mit konstanter Klebschicht

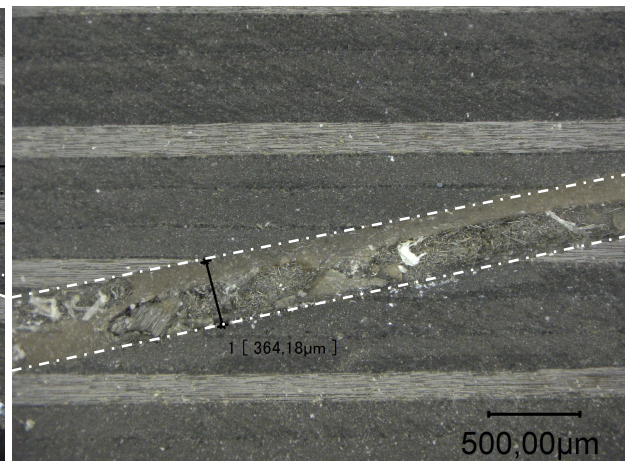
Abbildung 6.1: Übersicht über die in der Voruntersuchung verwendeten Schäftungsgeometrien: Die konstante Schäftung (a), die variable Schäftung mit variabler Klebschicht (b) und die variable Schäftung mit konstanter Klebschicht (c). In (b) ist deutlich die Aufdickung der Klebschicht in den Bereichen der steileren Schäftung zu erkennen.

Die Auswertung der Voruntersuchungen zum Klebschichteinfluss ergab folgende Schlussfolgerungen für die Couponprobenfertigung:

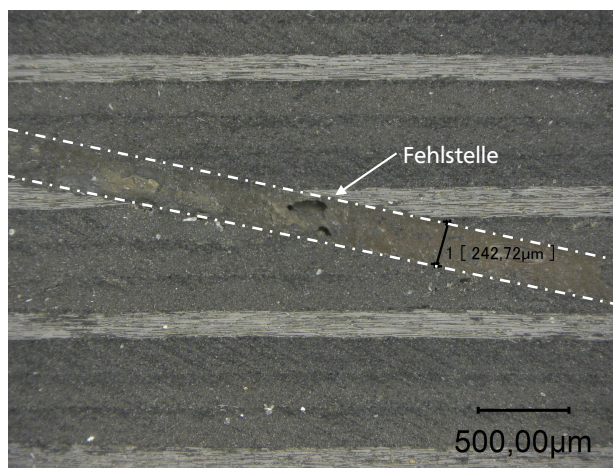
- Auf der oberen Seite der Schäftung, d.h. dort, wo der Vakuumaufbau an der Probe anliegt, ist die Klebschichtdicke geringer als auf der unteren Seite. Durch die Zuschäftung verringert sich der Querschnitt der oberen Probefälfte und damit die Steifigkeit. Der Druck des Vakuumsack drückt daher an dieser Seite das Laminat in die Klebschicht.



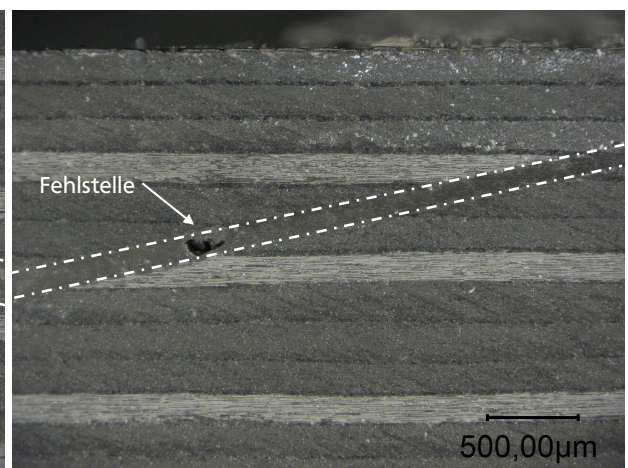
(a) Lagenausrichtung und geringe Klebschichtdicke an Unterseite



(b) Fehlstelle in Klebschicht



(c) Klebschichtdicke zu groß



(d) Probe mit Hausvakuum

Abbildung 6.2: Ausgewählte Mikroskopiebilder zur Verifizierung der Klebschichtqualität. Die Schnittfläche ist 100-fach vergrößert.

- Die Ausrichtung der Lagen beider Fügepartner zueinander ist generell gut. Teilweise sind die Lagen um eine Lagenbreite zueinander verschoben wie in Abbildung 6.2 (a) dargestellt ist. Dies gilt besonders an der Oberseite der Probe, an der die Klebschichtdicke infolge des bei der Fertigung aufliegenden Vakuumsacks dünner ausfällt.
- Die Proben mit einer Klebschichtdicke von 0,3 mm weisen bei allen Proben die in Abbildung 6.2 (b) gezeigten Fehlstellen auf. Teilweise betrifft dies auch Proben mit einer eingestellten Dicke von 0,2 mm, wenn die in der Probe vorhandene Dicke deutlich über diesem Wert liegt. Ein solches Beispiel ist in Abbildung 6.2 (c) dargestellt. Es sollte daher versucht werden, die Proben so zu fertigen, dass die Klebschichtdicke unterhalb von 0,2 mm bleiben.
- Bei allen Probengeometrien entspricht die eingestellte nicht der erreichten Klebschichtdicke. Die Klebschichten sind zu dick. Bei den Proben mit einer variablen Schäftung und konstanter Klebschichtdicke wurden beispielsweise Klebschichtdicken von 186 μm gemessen (statt 130 μm).
- Die Proben, bei denen während der Fertigung das Hausvakuum verwendet wurde, weisen Fehlstellen innerhalb der Klebschicht auf. Eine solche Fehlstelle ist in Abbildung 6.2 (d) zu

erkennen. Das Hausvakuum ist daher für eine qualitativ hochwertige Verklebung der Proben ungeeignet.

6.1.2 Erwärmung der Proben

Die Erwärmung der Proben auf die angestrebte 100 °C-Prüftemperatur für Zugversuche bei ETD-Bedingungen erfolgt über flexible Silikonheizmatten des Typs *HSI* der Firma *Hillesheim GmbH*. Diese werden mithilfe von Federklemmen jeweils auf einer Seite der Probe angebracht. Beide Matten sind mit einem Temperaturregler des Typs *HT 55*² der gleichen Firma verbunden, welcher über einen in den Silikonmatten integrierten Temperatursensor eine Information über die aktuell anliegende Temperatur erhält. Eine Erwärmung auf bis zu 200 °C ist möglich. Die Abmaße der Heizmatten betragen 250 x 1600 mm, d.h. die komplette Probenbreite und der Schäftungsbereich werden abgedeckt. Ziel der Voruntersuchung war die Analyse des Erwärmungsverhaltens der Probe. Dabei wurde ermittelt, wie viel Zeit die Heizmatten zum Erreichen einer eingestellten Temperatur benötigen und ab welchem Zeitpunkt sich die gewünschte Temperatur in der Mitte und der Oberfläche der Probe einstellt. Außerdem wurde auf diese Art festgestellt, inwiefern eine dauerhafte Temperaturdifferenz zwischen angezeigter Temperatur der Heizmatten und der wahren Temperatur im Inneren der Probe vorhanden ist. Die Probentemperatur wird mithilfe einer Thermografiekamera des Typs *ThermaCAM EA* der Firma *Flir Systems* ermittelt. Der gesamte Versuchsaufbau ist in Abbildung 6.3 (a) dargestellt. Die Probe ist zwischen den Federklemmen und den Heizmatten eingespannt. Davor befinden sich die Thermografiekamera und der Temperaturregler. Abbildung 6.3 (b) zeigt das Bild der Thermografiekamera mit dem Messpunkt. Die Heizmatten und die sich dazwischen befindliche Probe sind an der gelblichen Farbgebung zu erkennen. Die angezeigte Temperatur entspricht der Messtemperatur im Messfeld. Der benötigte Emissionskoeffizient ϵ von CFK kann über die Eingabe der Umgebungstemperatur ermittelt werden und ergab sich zu $\epsilon = 0,96$.

Die Vorversuche zeigten folgende Ergebnisse:

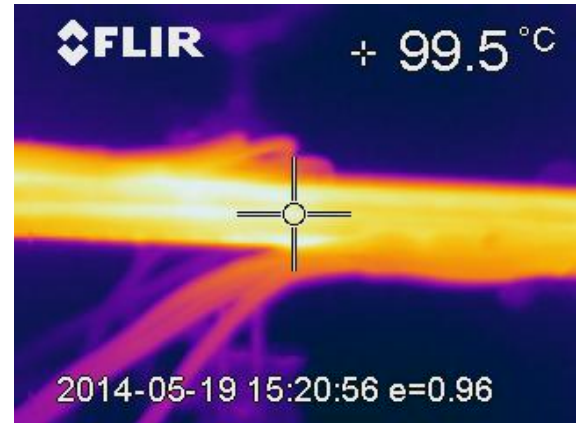
- Die Temperaturverteilung auf den Silikonmatten ist sehr unregelmäßig. Im Bereich der Kabelanschlüsse ist die Temperatur um ca. 20 °C höher als an den Rändern.
- Die eingestellte und die tatsächlich auf dem Bauteil vorherrschende Temperatur unterscheidet sich teilweise deutlich (ca. 10 °C Abweichung).
- Die Heizmatten erreichen nach ca. 6 Minuten ihre eingestellte Temperatur. Beide Matten heizen sich jedoch nicht in der selben Zeit auf. Je nach Anordnung der Klammern waren unterschiedliche Aufheizzeiten zu beobachten.
- Die Probe sollte ca. 10 Minuten beheizt werden, um einen ausreichenden Wärmeeintrag zu garantieren.
- Die auf dem Regler angezeigte Temperatur der Heizmatten variiert um ca. ± 3 °C um den im Regler eingestellten Temperaturwert.

Die Voruntersuchung zeigt, dass eine große Anzahl von Unsicherheiten bezüglich der korrekten Einstellung des gewünschten Temperaturfeldes besteht. Dies liegt einerseits an den verwendeten Geräten und andererseits an der Fixierung der Heizmatten auf der Probe. Es war aufgrund des geplanten Zeitrahmens nicht möglich, weitere Methoden zum Erwärmen zu untersuchen. Zur Sicherstellung der angestrebten 100 °C-Prüftemperatur wird die Probenoberfläche während der Zugprüfung direkt per Thermografiekamera vermessen.

² Die Datenblätter der Heizmatten und des Reglers befinden sich in Anhang C.



(a) Versuchsaufbau



(b) Thermografiebild

Abbildung 6.3: Übersicht über den Versuchsaufbau zur Untersuchung des Temperaturfeldes mit der durch die Federklemmen fixierten Probe, der Thermografiekamera und dem Regler (a). Der Temperaturmesspunkt befindet sich in der runden Mitte des Fadenkreuzes (b).

6.2 Probenprogramm

Teile der in Kapitel 5 simulierten Probengeometrien werden in einem Zugversuch geprüft. Um den Fertigungs- und Prüfaufwand zu minimieren, werden von jeder Art drei Proben hergestellt. Dies ist für die Verifizierung des Potentials variabler Schäftungen zunächst ausreichend. Eine Ausnahme bilden die Proben mit einer variablen Klebschicht, von denen sechs geprüft wurden. Folglich umfasst das Probenprogramm insgesamt 45 Couponproben. Abbildung 6.4 zeigt eine Übersicht mit Bezeichnung der Probekörper, dem Lagenaufbau, der Probenanzahl, der Ausgangsplatte, der Prüftemperatur, dem Schäftungswinkel und der Probengeometrie.

6.3 Fertigung der Proben

Eine Übersicht über die wichtigsten Stationen der Couponprobenfertigung ist in Abbildung 6.5 dargestellt. Zunächst werden Platten mit den äußeren Abmaßen 420 x 320 mm aus dem bereits vorgestellten Prepreg *Hexcel 8552 IM-7* gefertigt. Entsprechend den Laminataufbauten QI1 oder QI3 muss die korrekte Stapelfolge beachtet werden. Das Prepreg ist auf einer Rolle als UD-Gelege vorhanden. Der Zuschnitt der einzelnen Lagen erfolgt mit einem speziellen *Cutter* (computergesteuertem Zuschneidetisch). In das integrierte Schnittprogramm wird die Anzahl benötigter 0°-,

Nr.	Bezeichnung	Laminataufbau	Anzahl	Ausgangsplatte	Prüftemperatur	Schäftungswinkel [°]				Geometrie		
						0	45	90		Probenbreite [mm]	Probenlänge [mm]	
1	CAIRE-IM7-1-TEN-D-RT-V-1	Q11	3	Q11-1	RT	1	3,4	21,4		25,4	280	
2	CAIRE-IM7-1-TEN-D-RT-V-L	Q11	6	Q11-3	RT	1	3,4	21,4		25,4	280	
3	CAIRE-IM7-1-TEN-D-RT-K-2	Q11	3	Q11-3	RT	2,862	2,862	2,8624		25,4	280	
4	CAIRE-IM7-1-TEN-D-RT-K-1	Q11	3	Q11-1	RT	2,454	2,454	2,454		25,4	280	
5	CAIRE-IM7-1-TEN-D-RT-V-2	Q11	3	Q11-1	RT	1	5,65	21,4		25,4	280	
6	CAIRE-IM7-1-TEN-D-RT-V-3	Q11	3	Q11-1	RT	1,3	3,4	21,4		25,4	280	
7	CAIRE-IM7-1-TEN-D-RT-V-4	Q11	3	Q11-2	RT	var	var	var		25,4	280	
8	CAIRE-IM7-1-TEN-D-RT-V-5	Q11	3	Q11-2	RT	2	5,65	21,5		25,4	280	
9	CAIRE-IM7-1-TEN-D-100-V-1	Q11	3	Q11-4	HOT	1	3,4	22		25,4	280	
10	CAIRE-IM7-1-TEN-D-100-K-1	Q11	3	Q11-4	HOT	2,862	2,862	2,8624		25,4	280	
11	CAIRE-IM7-3-TEN-D-RT-V-1	Q13	3	Q13-1	RT	1	3,4	22		25,4	280	
12	CAIRE-IM7-3-TEN-D-RT-K-2	Q13	3	Q13-2	RT	2,862	2,862	2,8624		25,4	280	
13	CAIRE-IM7-3-TEN-D-RT-V-2	Q13	3	Q13-1	RT	1	5,65	22		25,4	280	
14	CAIRE-IM7-3-TEN-D-RT-V-3	Q13	3	Q13-1	RT	1,3	3,4	22		25,4	280	
			Gesamt:	45								

Abbildung 6.4: Übersicht über das Probenprogramm für den Zugversuch. In den Bezeichnungen bedeutet **V**, dass es sich um eine variable Schäftung handelt, **K** steht für eine konstante Schäftung. Aus den Bezeichnungen ist außerdem die Prüftemperatur zu entnehmen: **RT** steht für Raumtemperatur, d.h. RTD-Bedingungen; **100** für die Prüfung bei ETD-Bedingungen.

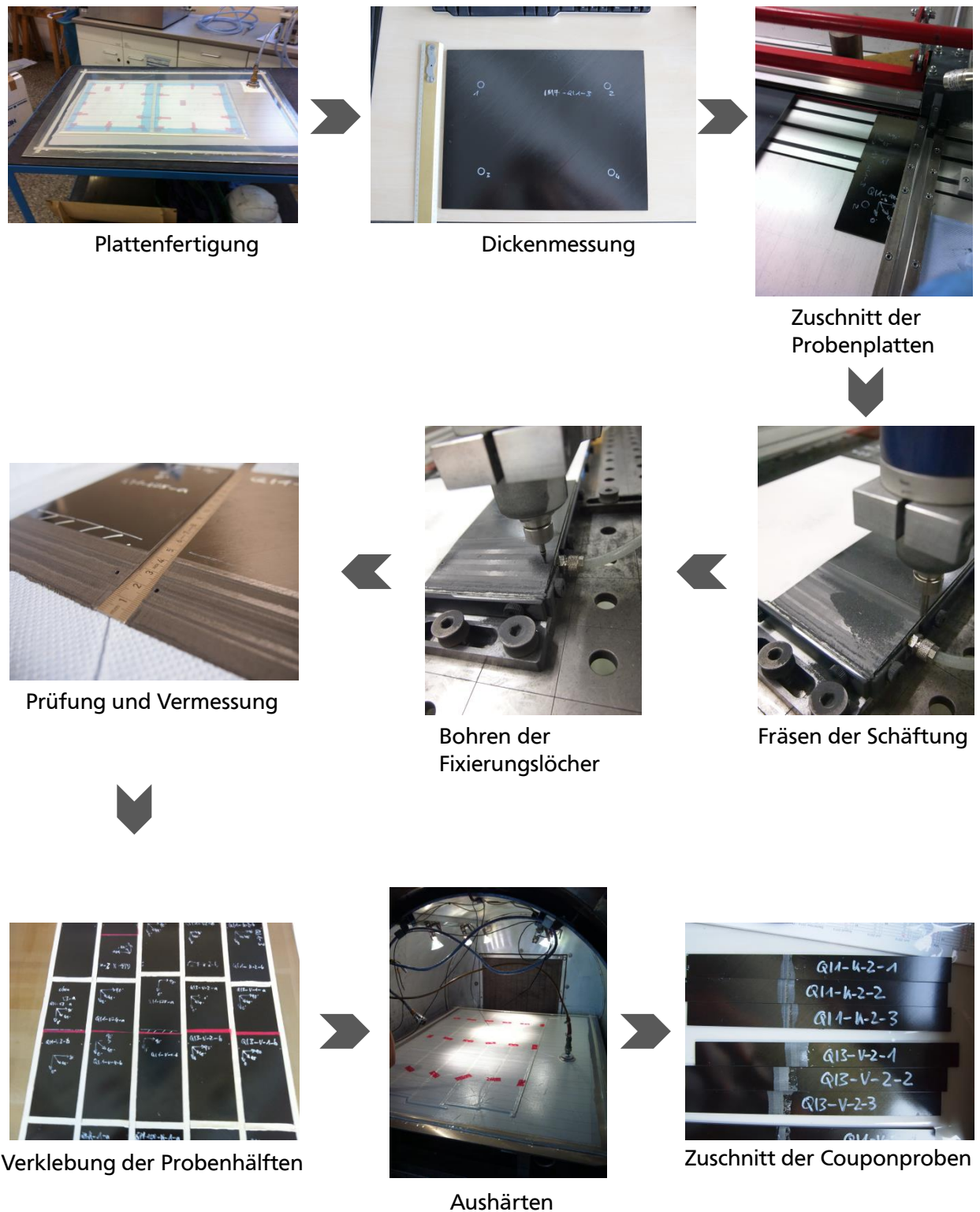


Abbildung 6.5: Darstellung des kompletten Fertigungsprozesses der Couponproben als Flussdiagramm. Von der Herstellung der CFK-Laminate bis zum fertigen Probekörper sind neun Schritte durchzuführen.

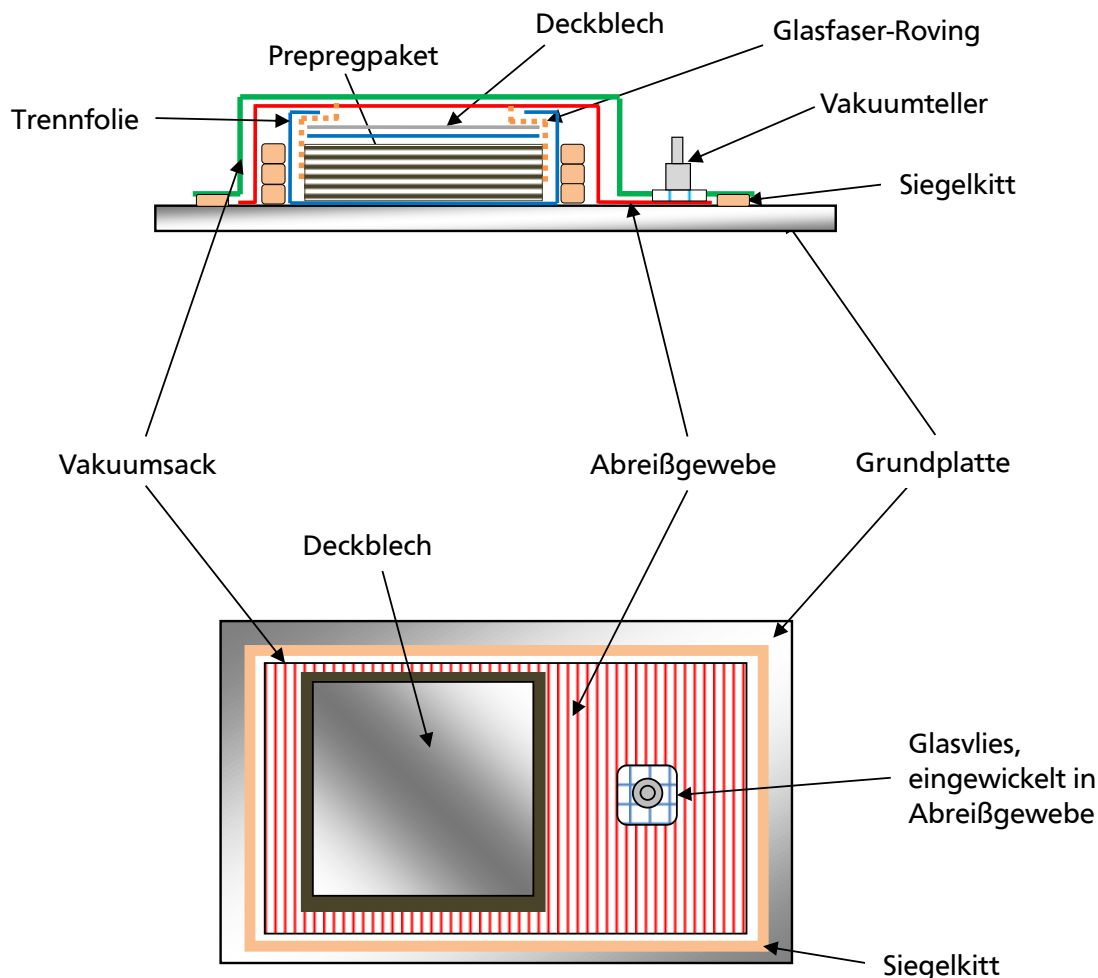


Abbildung 6.6: Darstellung des Vakuumaufbaus zur Fertigung der CFK-Platten als Seitenansicht (oben) und Draufsicht (unten)

90°- und $\pm 45^\circ$ -Lagen eingegeben. Das Programm bestimmt automatisch das Schnittbild mit dem geringsten Verschnitt. Nach dem Zuschnitt werden die Lagen entsprechend der vorgegebenen Stapelfolge von Hand aufeinander gelegt. Die somit erzeugten 24-lagigen Prepreg-Platten werden einseitig in Trennfolie eingewickelt und mit einer zuvor mit Trennmittel bestrichenen, passgenauen Aluminiumplatte abgedeckt. Anschließend wird das Paket umgedreht und die andere Seite mit Trennfolie umwickelt. Um der Luft im Prepreg während des Autoklavprozesses ein Ausweichen zu ermöglichen, werden kurze Glasfaser-Rovings als Belüftungskanäle an die Plattenseiten geklebt. Die eingewickelten Plattenpakete werden nun auf eine mit Trennmittel vorbehandelte Stahlplatte gelegt und mit Siegelkitt umrandet. Dies verhindert ein seitliches Austreten von Epoxidharz während des Fertigungsprozesses. Der Aufbau wird mit Abreißgewebe überdeckt und ein Vakuumanschluss am Rand der Grundplatte befestigt. Zum Schluss wird die Vakuumfolie angebracht und auf den Siegelkitt gepresst. Der Aufbau wird an das Vakuumsystem angeschlossen und einem Vakuumdruck von 0,05 bar ausgesetzt. Ein Schnitt durch den kompletten Vakuumaufbau ist in Abbildung 6.6 dargestellt. Zum Aushärten werden die Platten in einen Autoklav geschoben und bei einem Absolutdruck von 7 bar und einer maximalen Temperatur von 180°C über ca. 8 Stunden ausgehärtet. Der genau verwendete Zyklus ist dem Datenblatt in Anhang C zu entnehmen.

Nach diesem Verfahren werden vier CFK-Platten mit Lagenaufbau QI1 und eine Platte mit Lagenaufbau QI3 gefertigt. Nach dem Aushärten und Entformen wird vor dem weiteren Bearbeiten zunächst die Dicke der einzelnen Platten bestimmt. Dazu werden vier verschiedene Stellen auf den Laminaten

mit einer Schablone markiert. Die Position der Messpunkte ist in Abbildung 6.7 dargestellt. Die Punkte liegen ca. 80 mm vom Plattenrand entfernt. Eine genaue Bestimmung der Plattendicke wird für den späteren Fräsprozess benötigt, da dem Fräsprogramm ein Startpunkt in vertikaler Richtung (y-Achse) angegeben werden muss. Alle Platten zeigten eine durchschnittliche Dicke von $t = 3,08$ mm und wichen damit in geringem Maße von der theoretisch ermittelte Dicke (3 mm) ab.

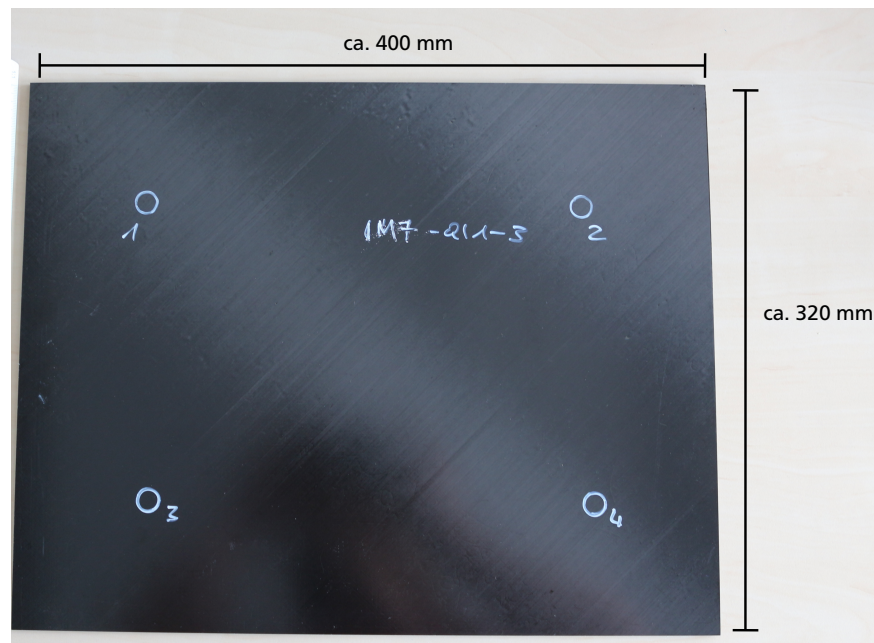


Abbildung 6.7: Die auf der Ausgangsplatte gewählten Positionen für die Dickenmessung sind mit einem weißen Kreis markiert.

Nach der Messung werden die Platten mithilfe einer Diamantsäge in kleinere Stücke mit den äußeren Abmaßen $100,2 \times 197$ mm zerschnitten. Aus einer Ausgangsplatte können somit sechs Einzelplatten hergestellt werden, wobei zwei Platten die Grundlage eines Couponprobensatzes für je drei Probekörper bilden. Diese Stücke werden auf den Frästisch gespannt. Die Schäftungsgeometrie wird mithilfe des CAD-Programms *CATIA* erstellt und an die in Abschnitt 3.2 vorgestellte Fräse übertragen. Als Vorgabe für die Schäftungsgeometrie dienen die Koordinaten der virtuellen Knickpunkte in der Mitte der späteren Klebschicht. Die Verschiebung in Normalenrichtung zur Klebschichtmitte wird vom Fräsprogramm automatisiert generiert. Der Offset von einer halben Klebschichtdicke muss nicht für beiden Probenhälften gesondert berechnet werden. Vor Beginn des Fräsprozesses wird ein Nullpunkt vorgegeben, welcher den Startpunkt für das Programm bildet. Der Fräser fährt die Probenplatte von vorne an, d.h. die Schäftung wird von unten nach oben erstellt. Anschließend werden an den seitlichen Rändern der Platten die Bohrungen für die Fixierungsstifte hergestellt. Diese ermöglichen die genaue Einstellung der Klebschichtdicke und verhindern eine Verschiebung der Platten in Längs- und Querrichtung. Die Bohrungen haben einen Durchmesser von $d = 2,6$ mm. Als Passstifte werden ungehärtete Zylinderstifte mit den Maßen $2,5 \times 6$ mm verwendet. Vor dem Einsetzen sollten diese mit Trennmittel bestrichen werden, damit das spätere Entfernen aus den verklebten Probenhälften leichter möglich ist.

Vor dem Verkleben müssen die Probenhälften gereinigt werden. Für eine Reinigung der gesamten Probenhälfte wird Aceton verwendet. Die Klebschicht wird nochmals gesondert mit Isopropylalkohol gesäubert. Damit ist eine ausreichende Sauberkeit der Klebflächen garantiert. Die unteren Plattenhälften werden auf eine eingetrennte Stahlplatte gelegt. Der Filmklebstoff wird in Stücke entsprechend der Klebfläche zugeschnitten und auf die untere Probenhälfte gelegt. Zur besseren Haftung sollte der Klebfilm kurz mit der Hand angedrückt werden. Beim Einlegen wird die Schicht

von den zuvor eingelegten Fixierungsstiften durchstoßen. Anschließend wird die obere Plattenhälfte aufgelegt. Alle Platten werden mit Siegelkitt umrahmt. Es müssen zwei Lagen Abreißgewebe auf die Proben gelegt werden, da die Spitzen der Fixierungsstifte ca. 3 mm aus den Proben herausragen. Das Abreißgewebe nimmt die durch den Vakuumsack aufgebrachte Kraft auf und entlastet die darüber liegende Folie. Somit wird eine Leckage und damit eine Zerstörung der Proben während des Autoklavprozesses vermieden. Zur Sicherheit werden die Spitzen der Stifte mit einem zusätzlichen Klebeband abgedeckt, damit im Falle eines Folienrisses eine zusätzliche Barriere das Eindringen von Luft in den Vakuumaufbau verhindert. Die Proben werden im Autoklav bei 130°C und 3 bar Überdruck ausgehärtet. Dieser Zyklus dauert ohne Aufheizphase ca. 2 Stunden.

Nach Entformen der Probenplatten und Entfernen der Fixierungsstifte werden die Platten auf die geforderte Probenlänge von $l = 280$ mm geschnitten. Die Ränder der Plattenlängsseiten werden anschließend besäumt. Aus der restlichen Platte werden drei Streifen mit einer Breite von jeweils $b = 25,4$ mm herausgeschnitten. Die Proben müssen vor der Zugprüfung für drei Tage im Prüflabor gelagert werden, um eine ausreichende Anpassung an das Raumklima zu ermöglichen.

Das Bekleben der Zugproben mit Aufleimern³ im Bereich der Einspannung ist nicht vorgesehen, da in Vorversuchen eine ausreichende Klemmkraft der Spannvorrichtung nachgewiesen wurde. Zum besseren Halt der Proben werden die Enden mit Schleifpapier aufgeraut.

Für die Analyse der Laminatdehnung werden die Proben mit einem Dehnungsmessstreifen (DMS) des Typs *1-LY11-6/120* beklebt. Da die zu erwartende Dehnung des Laminats bei allen Proben eines Satzes gleich ist, wird dies nur für die Probekörper mit der laufenden Probenendung -3 durchgeführt. Die DMS werden 90 mm von der oberen Kante mittig auf der flachen Probenseite mit Sekundenklebstoff aufgeklebt. Die Klebfläche wird vorher leicht aufgeraut. Diese Position ist von der Einspannung ausreichend weit entfernt, liegt jedoch noch nicht im Bereich der Schäftung. Damit ist eine sichere Messung der reinen Laminatdehnung möglich.

6.4 Verifizierung der Probenqualität

Vor der Zugprüfung wird die Geometrie der Couponproben vermessen. Durch Einflüsse bei der Fertigung kann die Dicke des Laminats und die Breite der Probe variieren. Die ermittelten Abmaße werden in die Software der Zugprüfmaschine eingegeben, woraus über die Flächen und die Versagenslast die entsprechende Zugspannung ermittelt wird. Auch die Probendicke im Schäftungsbereich wird gemessen. Dieser Wert ermöglicht eine Aussage über die korrekte Ausrichtung der Fügepartner zueinander. Die ermittelten Werte sind im Anhang B zu finden.

Des Weiteren werden Schnittflächen der Proben ähnlich der in Abschnitt 6.1.1 durchgeführten Voruntersuchungen auf Klebschichtdicke, Klebschichtqualität, Fräskontur und Lagenversatz mithilfe eines digitalen Mikroskops untersucht. Um die Qualität zu bewerten, wird die Dicke der Klebschicht bei den Proben mit Lagenaufbau QI3 an elf definierten Punkten gemessen. Diese Punkte sind jeweils die Mitte der 0°- und 90°-Lagen. Da bei den QI1 Proben diese Lagen teilweise doppelt auftreten, wird an sieben Stellen gemessen. Aus den Messwerten wird der Mittelwert und eine Standardabweichung gebildet. Der gemittelte Wert dient dem Vergleich der Probenklebschichtdicke zur idealen Klebschichtdicke von 130 μm . Ein weiterer Aspekt ist die Ausrichtung der Lagen der beiden Fügepartner zueinander. Diese sollten über die Klebschicht in einer Linie fluchtend zueinander angeordnet sein. Bei den meisten Probekörpern ist es aufgrund der Messgenauigkeit schwierig einen Schäftungswinkel zu ermitteln. Diese Eigenschaft der Klebung wird daher nur an bestimmten Stellen stichprobenartig überprüft. Alle im Folgenden aufgeführten Messwerte sind über

³ Aufleimer bestehen aus faserverstärktem Kunststoff und werden bei Zugprüfungen an die Probenenden geklebt. Dies dient einer besseren Haftung der Probekörper in der Klemmvorrichtung der Zugprüfmaschine.

einen Probensatz gemittelt und spiegeln nicht die Geometrie der einzelnen Couponproben wider. Die Messpunkte für die Klebschichtdicke auf den Proben können nicht exakt definiert werden und variieren bei jeder Messung in geringem Maße. Daher sind die Ergebnisse nicht als exakte Angabe, sondern als Abschätzung zu betrachten. Aus diesem Grund wird im μm -Bereich auf die Angabe der zweiten Dezimalstelle verzichtet. Die im Folgenden dargestellten Mikroskopiebilder wurden mit einer 100-fachen Vergrößerung aufgenommen. Im letzten Abschnitt wird eine Bewertung der Fertigungsqualität der zuvor beschriebenen Proben durchgeführt und Gründe für mögliche Abweichungen von den angenommenen Werten genannt.

Qualität der Zugproben mit Lagenaufbau QI1

QI1-K-1 (CAIRE-IM7-1-TEN-D-RT-K-1) und QI1-K-2 (CAIRE-IM7-1-TEN-D-RT-K-2): Die Proben mit Lagenaufbau QI1 und einer konstanten Schäftung weisen generell eine gute Fertigungsqualität auf. Die Dicke des Laminats an den Einspannflächen liegt bei allen Proben in einem Bereich von 3,07–3,09 mm. Der Schäftungsbereich weist Laminatdicken von 3,05–3,1 mm auf. Die mittlere Klebschichtdicke der Proben QI1-K-1 beträgt $169,6 \mu\text{m}$, bei einer Standardabweichung von $37,3 \mu\text{m}$. Die Klebschicht der QI1-K-2 Probekörper weist im Mittel eine Dicke von $192,6 \mu\text{m}$ und eine Standardabweichung von $35 \mu\text{m}$ auf. Beide Probensätze liegen damit im idealen Klebschichtdickenbereich von 50–200 μm , weichen jedoch von der angenommenen Klebschichtdicke von 130 μm um 30 % (QI1-K-1) bzw. 48 % (QI1-K-2) ab. Bei beiden Probensätzen ist eine gute Lagenausrichtung zueinander erreicht. Die Klebschichtdicken nehmen zu der Seite, an welcher der Vakuumsack anlag, ab. Dies ist in Abbildung 6.8 dargestellt. Die hellen Schichten zeigen die 0° -Lagen. Die abnehmende Klebschichtdicke ist an zwei Messpunkten zu erkennen. Im Randbereich sind auch die Lagen nicht korrekt zueinander ausgerichtet. Die Schäftungswinkel zeigen geringe Abweichungen zu den geplanten Winkelwerten.



Abbildung 6.8: Mikroskopiebild der Probe QI1-K-2. Anhand der zwei Messpunkte ist zu erkennen, wie die Klebschicht zum Probenrand hin abnimmt.

QI1-V-1 (CAIRE-IM7-1-TEN-D-RT-V-1): Die Laminatdicke der Proben des Satzes QI1-V-1 liegt an den Einspannflächen durchschnittlich bei 3,08 mm. Die Breite der Proben variiert von 25,39–25,44 mm. Die Laminatdicke im Bereich der Schäftung weist niedrigere Werte als die des Ausgangslaminats auf. Sie liegen in einem Bereich von 2,83–3,0 mm. Die durchschnittliche Klebschichtdicke beträgt $164,4 \mu\text{m}$ und weicht damit um 26 % von der einzustellenden Klebschichtdicke ab. Die Standardabweichung liegt bei $51,2 \mu\text{m}$. An der Seite, an welcher der Vakuumsack aufliegt, ist die Klebschicht zusammengedrückt. Ebenfalls ist zu beobachten, dass die Lagen über die Klebschicht nicht zueinander fluchten, sondern um ca. eine Lagenbreite verschoben sind. Die Winkel sind bei den Proben mit einer Variation schwer zu messen. Die an drei Stellen gemessenen Winkel liegen jedoch im Bereich der vorgesehenen Winkeleinstellung.

QI1-V-2 (CAIRE-IM7-1-TEN-D-RT-V-2): Die Laminatdicken der Proben des Satzes QI1-V-2 betragen durchschnittlich 3,08 mm. Im Schäftungsbereich weisen die Proben mit 3,44–3,5 mm eine höhere Dicke auf. Die Probenbreiten variieren zwischen 25,2–25,45 mm. Die mittlere Klebschichtdicke beträgt $111,6 \mu\text{m}$ bei einer Standardabweichung von $66,5 \mu\text{m}$. Diese geringe mittlere Klebschicht bedeutet eine Abweichung von -14 % von der idealen Klebschichtdicke. Im Bereich der großen

Schäftungswinkel an den 90°-Lagen weist die Klebschicht eine geringe Dicke von min. 18 µm auf, d.h. dort berühren sich die Fügepartner annähernd. Außerdem ist zu beobachten, dass sich die Spitzen der einzelnen Lagen überlappen, statt ausgerichtet zu sein. Dadurch entstehen große Variationen der Klebschichtdicke, wie im Schnittbild in Abbildung 6.10 dargestellt. Auch hier wird die Klebschicht zum Rand hin dünner. Auf der Seite der Probenplatte, welche während der Fertigung auf der Platte aufliegt, wurde Klebstoff aus dem Klebstoffspalt heraus gedrückt. Es hat sich eine zusätzliche Schicht Klebstoff auf der Außenseite der Proben gebildet.

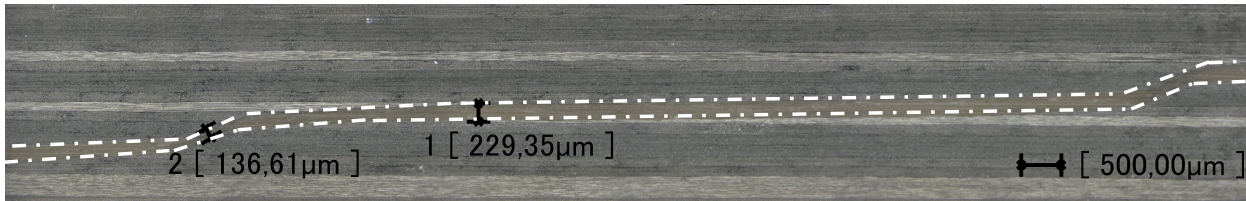


Abbildung 6.9: Mikroskopiebild der Probe QI1-V-1. Die Klebschichtdicke ist nicht konstant.

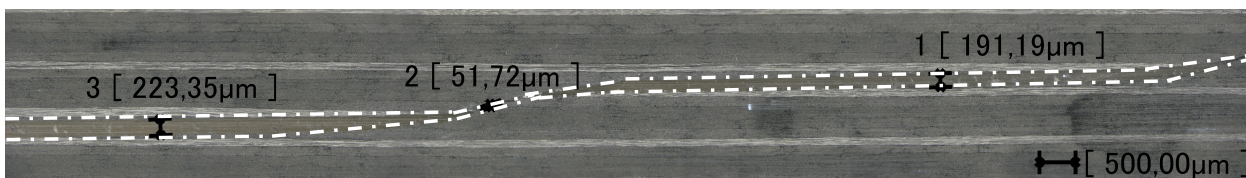


Abbildung 6.10: Mikroskopiebild der Probe QI1-V-2. Die drei Messpunkte zeigen, dass eine variable Klebschichtdicke vorherrscht.

QI1-V-3 (CAIRE-IM7-1-TEN-D-RT-V-3): Die Proben des gleichen Lagenaufbaus QI1-V-3 weisen eine ähnliche Qualität wie die zuvor genannten Proben auf. Die Dicke des Laminats im Bereich der Einspannung beträgt 3,08 mm; im Bereich der Schäftung 3,1–3,18 mm. Die Breite der Proben variiert von 25,32 mm bis 25,7 mm. Die durchschnittliche Klebschichtdicke beträgt 210,7 µm und die Standardabweichung 63,4 µm. Dies bedeutet eine Abweichung von 62 % von der idealen Klebschichtdicke. Im Bereich der 90°-Lagen ist die Klebschicht dünner, liegt jedoch an allen Stellen bei über 100 µm. Die Lagen fluchten nicht zueinander und weisen eine Verschiebung um ca. eine Lagenbreite auf. Eine stichprobenartige Abschätzung der Winkel zeigt gute Übereinstimmung mit den vorgesehenen Schäftungswinkeln. Wie bei den zuvor gezeigten Proben, ist die Klebschicht auf der Seite des Vakuumaufbaus zusammengepresst. Dort liegen die Lagen sehr dicht beieinander. Während der Fertigung ist ebenfalls Klebstoff aus dem Klebspalt zwischen Werkzeug und Probenplatte herausgeflossen und hat eine zusätzliche Schicht von bis zu 104 µm Dicke gebildet.

QI1-V-4 (CAIRE-IM7-1-TEN-D-RT-V-4): Das Laminat der Proben weist im Bereich der Einspannung eine mittlere Dicke von 3,06–3,08 mm auf. Die Breite variiert von 25,44 –25,56 mm. Der Schäftungsbereich ist mit 3,18–3,31 mm dicker das Ausgangslaminat. Durchschnittlich beträgt die Klebschichtdicke 158,6 µm und weicht damit um 22 % von der idealen Dicke ab. Es ergibt sich eine Standardabweichung von 67,4 µm. Die Klebschichtdicke variiert in einem großen Bereich von minimal ca. 80 µm bis maximal ca. 280 µm. Ein Ausschnitt eines Schnitts durch die Probe ist in Abbildung 6.11 dargestellt. Durch die stark variierende Klebschichtgeometrie sind die Probenhälften nicht korrekt zueinander ausgerichtet. Da sich die Schäftungswinkel bei dieser Probe in jeder Lage unterscheiden, ist keine fundierte Aussage über die Güte dieser möglich. Die Messung an einer Stelle im mittleren Bereich der Probe zeigt jedoch annähernd korrekt eingestellte Winkel. Die Lagen sind um ca. eine Lagenbreite zueinander verschoben. Auch bei dieser Probe ist Klebstoff aus dem Klebspalt während der Fertigung ausgetreten und bildet eine zusätzliche Schicht auf der Unterseite der Probe.

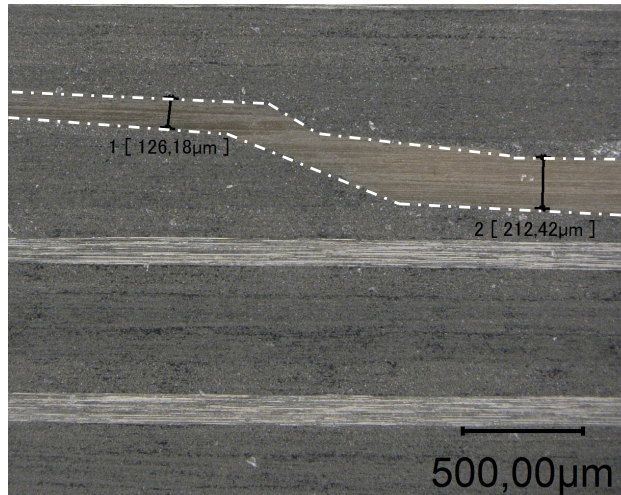


Abbildung 6.11: Mikroskopiebild der Probe QI1-V-4. Deutlich ist die verschobene Ausrichtung der beiden Fügepartner zueinander erkennbar.

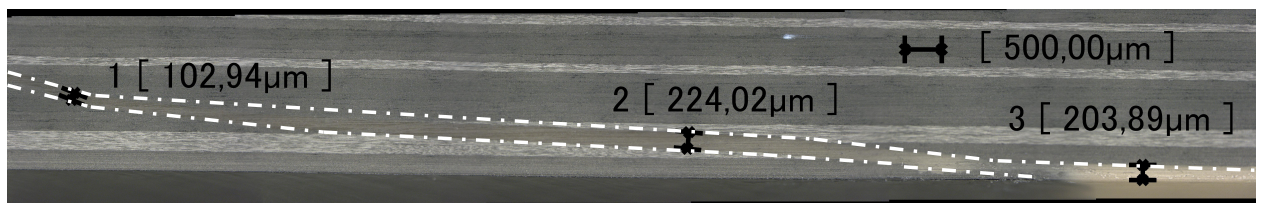


Abbildung 6.12: Mikroskopiebild der Probe QI1-V-5. Die unteren, doppelten 0°-Lagen zeigen die vertikale Verschiebung der Probekörper um ca. zwei Lagendicken.

QI1-V-5 (CAIRE-IM7-1-TEN-D-RT-V-5): Die Laminatdicken an der Einspannung haben eine gemittelte Dicke von 3,08 mm; im Bereich der Schäftung liegen diese bei 3,19–3,23 mm. Die Breite beträgt zwischen 25,46 mm und 25,5 mm. Die mittlere Klebschichtdicke weicht mit 29 % von der idealen Dicke ab und beträgt 167,8 μm , bei einer Standardabweichung von 45,7 μm . Die Lagen sind nicht zueinander fluchtend, sondern weisen eine Verschiebung von ca. zwei Lagendicken auf. Dies ist auch an Abbildung 6.12 erkennbar. Die an einer Stelle gemessenen Winkel befinden sich im Bereich der angestrebten Winkel. Die bei diesen Proben größeren Winkel der 0°- und $\pm 45^\circ$ -Lagen sind nachweisbar. Der auf der Probenoberseite eine Schicht bildende ausgetretene Klebstoff weist mit 225 μm eine große Dicke auf.

CAIRE-IM7-1-RT-D-V-L: Für die Probekörper mit einer variablen Klebschicht werden aufgrund der Aussagefähigkeit keine Messwerte für die Klebschichtdicke ermittelt. Wie bereits in den Voruntersuchungen gezeigt und in Abbildung 6.12 dargestellt, bilden sich an mehreren Stellen Fehlstellen im Klebstoff. Dies betrifft besonders die Bereiche der 90°-Lagen. Die Lagen sind ebenfalls nicht fluchtend ausgerichtet und weisen eine große Verschiebung zueinander auf. Dennoch ist es gelungen, die variable Klebschichtgeometrie zu erzeugen.

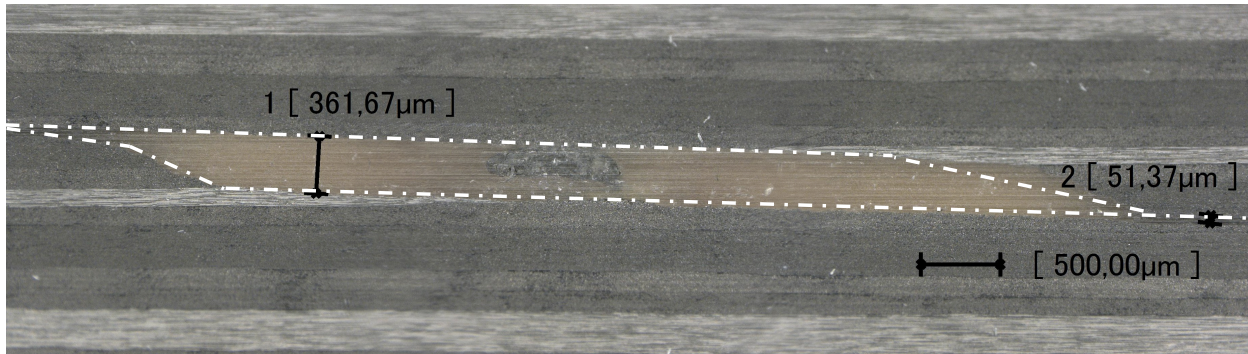


Abbildung 6.13: Mikroskopiebild der Probe QI1-V-L. Deutlich ist die Fehlstelle im Bereich der großen Klebstoffansammlung (doppelte 90°-Lagen) zu erkennen.

Qualität der Zugproben mit Lagenaufbau QI3

QI3-K-2 (CAIRE-IM7-3-TEN-RT-K-2): Die Proben mit Lagenaufbau QI3 und einer konstanten Schäftung weisen alle eine Breite von ca. 25,49 mm auf. Im Bereich der Einspannung beträgt die Dicke der Proben im Mittel 3,08 mm, im Schäftungsbereich 3,15–3,21 mm. Die mittlere Klebschichtdicke ist 168,7 µm, bei einer Standardabweichung von 57,7 µm. Damit weicht sie um 30 % von der idealen Klebschichtdicke ab. Die Lagen sind um ca. eine Lagendicke zueinander verschoben. Die Klebschicht verringert sich zu der Seite des Vakuumaufbaus.

QI3-V-1 (CAIRE-IM7-3-TEN-RT-V-1): Die mittlere Dicke der Proben im Einspannbereich ist 3,08 mm; die Breite 25,5 mm. Im Schäftungsbereich werden Dicken von 2,95–3,06 mm gemessen, wobei die Messwerte je nach Messpunkt variieren. Die Klebschicht ist im Durchschnitt 238,8 µm dick, bei einer Abweichung von 84 % von der idealen Klebschichtdicke. Dies entspricht einer Standardabweichung von 120,5 µm. Die Lagen sind stark zueinander verschoben, weshalb die Klebschichtdicke, wie in Abbildung 6.14 zu erkennen, variabel ist. Die Länge der Reparatur ist mit 80 mm ca. 10 mm länger als ausgelegt, weshalb die Probenhälften zu weit auseinander liegen. Auch dies bedingt die großen Klebschichtdicken und teilweise sind in bestimmten Bereichen Fehlstellen in der Klebschicht zu erkennen, da dort nicht genug Klebstoff zum Füllen des Klebspalts zur Verfügung stand.

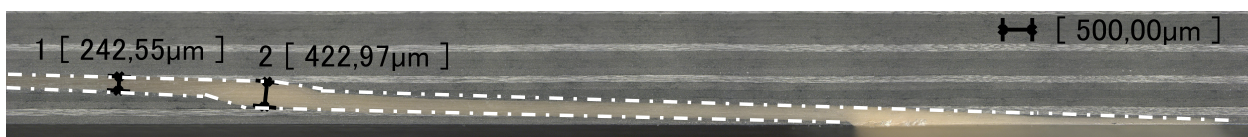


Abbildung 6.14: Mikroskopiebild der Probe QI3-V-1. Die zwei Messwerte zeigen die variable Klebschichtdicke und die Verschiebung der Probenhälften zueinander.

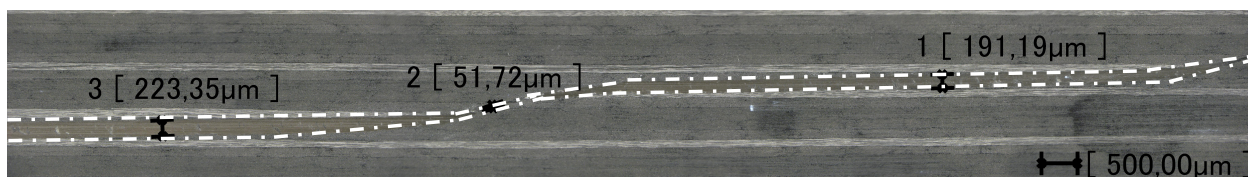


Abbildung 6.15: Mikroskopiebild der Probe QI3-V-2. Anhand der Messpunkte ist die über einen großen Bereich variierende Klebschichtdicke zu erkennen.

QI3-V-2 (CAIRE-IM7-3-TEN-RT-V-2): Die gemittelte Dicke der Lamine beträgt 3,09 mm, die Breite variiert im Bereich von 25,0–25,5 mm. Die Dicke im Schäftungsbereich beträgt 3,3 mm. Durchschnittlich weist die Klebschicht eine Dicke von 223,2 μm auf und weicht damit um 72 % von der idealen Dicke ab. Die Klebschichtdicke variiert über einen großen Bereich (min. ca. 40 μm , max. 475 μm), was sich in einer Standardabweichung von 162,8 μm widerspiegelt. Ein Beispiel für die Dickenvariation zeigt Abbildung 6.15. Der Grund dafür ist ein Versatz der Füge Teile in Längsrichtung der Probe um ca. 10 mm. Dies ist auch am Rand der Proben zu beobachten, da dort eine Delle im Bereich des Klebspaltes vorhanden ist. Dadurch entstehen große Klebschichtdicken im Bereich der 90°-Lagen, da dort die Schäftungswinkel am größten sind.

QI3-V-3 (CAIRE-IM7-3-TEN-RT-V-3): Die durchschnittliche Laminatdicke beträgt 3,09 mm im Bereich der Einspannung und 3,3 mm im Bereich der Schäftung. Die Breite der Proben variiert von 25,0 mm bis 25,5 mm. Die Klebschichtdicke beträgt durchschnittlich 160,5 μm und weicht damit um 23 % von der idealen Klebschichtdicke ab. Die Standardabweichung wurde zu 41,4 μm berechnet. Anhand dieser Zahlen ist zu erkennen, dass die Klebschichtdicke annähernd konstant ist. Dies zeigt auch der Ausschnitt eines Probenschnitts in Abbildung 6.16. Dennoch sind die Lagen nicht fluchtend ausgerichtet, sondern um ca. drei Lagendicken zueinander verschoben. Der Grund für diese Verschiebung liegt darin, dass viel Klebstoff aus dem Klebstoffspalt heraus gedrückt wurde. Die gemessenen Winkel weisen annähernd die eingestellten Werte auf.

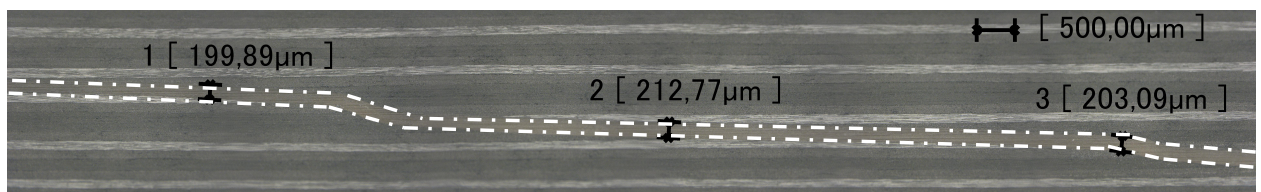


Abbildung 6.16: Mikroskopiebild der Probe QI3-V-3. Die Klebschichtdicke ist annähernd konstant.

Qualität der Zugproben für Versuche in ETD-Bedingungen

QI1-100-K-1 (CAIRE-IM7-1-TEN-100-K-1): Die Proben für die Versuche unter ETD-Bedingungen mit einer konstanten Schäftung weisen eine mittlere Laminatdicke von 3,09 mm auf; die Breite beträgt im Durchschnitt 25,5 mm. Im Bereich der Schäftung variiert die Probendicke in einem Bereich von 3,1–3,21 mm. Die Klebschicht weist eine gemittelte Dicke von 181,3 μm auf und liegt damit 39 % über der idealen Dicke. Die Standardabweichung beträgt 84,5 μm . Die Lagen sind um ca. 80 μm vertikal zueinander verschoben. An der Probenoberseite an welcher der Vakuumaufbau anliegt nimmt die Klebschichtdicke ab. Der eingestellte Schäftungswinkel beträgt ca. 2,48° und weicht damit im geringen Maße vom berechneten Winkel von 2,454° ab.

QI1-100-V-1 (CAIRE-IM7-1-TEN-100-V-1): Die Dicke des Laminats der ETD-Probekörper mit einem variablen Schäftungsbereich beträgt durchschnittlich 3,08 mm; die Breite 25,46 mm. Im Schäftungsbereich betragen die Dicken 3,12–3,21 mm. Die Klebschicht ist durchschnittlich 124,8 μm dick bei einer Standardabweichung von 94,9 μm . Dies entspricht einer Abweichung von der idealen Dicke um -4 %. Die Klebschichtdicke variiert stark (min. 28,3 μm bis max. 284,9 μm), wobei sich die gegenüberliegenden Lagen teilweise komplett berühren. Die Lagen weichen in der Ausrichtung um ca. 1,5 Lagenbreiten voneinander ab. Zur Seite des Vakuumsacks hin wird die Klebschicht dünner. Die durch die unzureichende Ausrichtung entstandene variable Klebschichtdicke zeigt Abbildung 6.17.

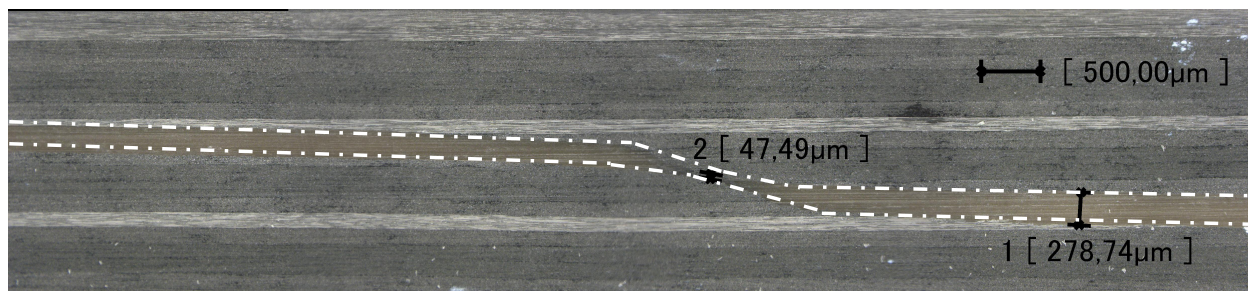


Abbildung 6.17: Mikroskopiebild der Probe QI1-100-V-1. Die Lagenausrichtung und die variable Klebschichtdicke zeigen die unzureichende Probenqualität dieses Probensatzes.

Tabelle 6.1: Übersicht über die zur Beurteilung der Probenqualität verwendeten Werte

Bezeichnung	Gemittelte Klebschichtdicke	Standardabweichung	Variationskoeffizient	Abweichung von id. Klebschichtdicke
Formelzeichen	\bar{t}_K	s	ν	Δt_K
Einheit	μm	μm	%	%
QI1-K-1 (CAIRE-IM7-1-TEN-D-RT-K-1)	169,6	37,3	21,99	30
QI1-K-2 (CAIRE-IM7-1-TEN-D-RT-K-2)	192,6	35	18,16	48
QI1-V-1 (CAIRE-IM7-1-TEN-D-RT-V-1)	164,4	51,2	31,16	26
QI1-V-2 (CAIRE-IM7-1-TEN-D-RT-V-2)	111,6	66,5	59,57	-14
QI1-V-3 (CAIRE-IM7-1-TEN-D-RT-V-3)	210,7	63,4	30,07	62
QI1-V-4 (CAIRE-IM7-1-TEN-D-RT-V-4)	175,1	54,8	31,28	35
QI1-V-5 (CAIRE-IM7-1-TEN-D-RT-V-5)	167,8	45,7	27,24	29
QI3-K-2 (CAIRE-IM7-3-TEN-D-RT-K-2)	168,7	57,7	34,23	30
QI3-V-1 (CAIRE-IM7-3-TEN-D-RT-V-1)	238,8	120,5	50,47	84
QI3-V-2 (CAIRE-IM7-3-TEN-D-RT-V-2)	223,2	162,8	72,94	72
QI3-V-3 (CAIRE-IM7-3-TEN-D-RT-V-3)	160,5	41,7	26	23
QI1-100-K-1 (CAIRE-IM7-1-TEN-D-100-K-1)	181,3	84,5	46,6	39
QI1-100-V-1 (CAIRE-IM7-1-TEN-D-100-V-1)	124,8	94,9	76	-4

Allgemeine Bewertung der Probenqualität

In Tabelle 6.1 sind die einzeln aufgeführten Werte nochmals zusammengefasst. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Standardabweichungen untereinander wird zusätzlich der Variationskoeffizient ν angegeben. Diese relative Standardabweichung berechnet sich aus der Formel

$$\nu = \frac{s}{\bar{t}_K} \quad (6.1)$$

Die Breite der Proben variiert um $\pm 0,2$ mm, da der Anschlag der verwendeten Diamantsäge ein mechanisches Spiel aufweist. Die Werte liegen innerhalb der von der Norm *prEN 6066* vorgegebenen maximalen Abweichung von $\pm 0,2$ mm.

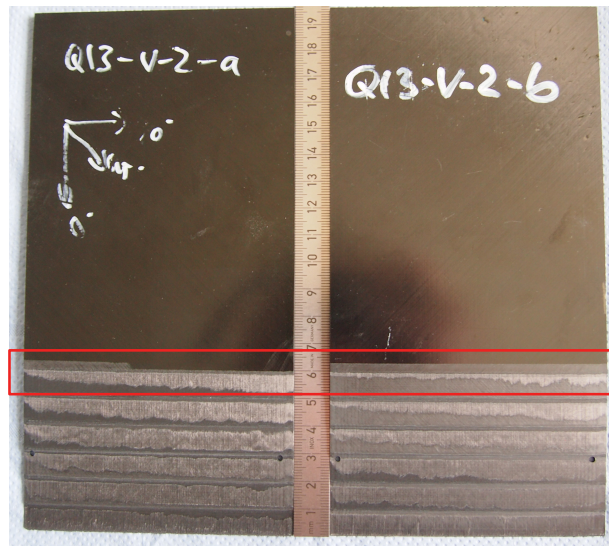


Abbildung 6.18: Die während des Fräsprozesses entstandene Frässpuren auf der Oberseite der Plattenhälften sind deutlich erkennbar (roter Rahmen).

Die Plattenhälften wurden vor dem Verkleben auf die Qualität der gefrästen Schäftung untersucht. Dabei waren bei manchen Oberflächen zusätzliche Fräuserspuren außerhalb des Schäftungsbereichs erkennbar. Diese Schäden sind auf die inkorrekte Haftung der Proben am Frästisch oder die falsche Vorgabe der Laminatdicke zurückzuführen. Abbildung 6.18 zeigt die zusätzlichen Frässpuren oberhalb des eigentlichen Schäftungsbereichs.

Trotz der Verwendung von *HYSOL EA9695 NW* mit einem Vlies als Füllstoff konnte ein Herausdrücken des Klebstoffs aus dem Klebspalt nicht verhindert werden. Die Folge ist eine sich auf der Probenunterseite zwischen Platte und Probe ausgebildete Klebschicht, die ein korrektes Aufliegen der beiden Probenhälften verhindert. Dies ist bei der Mehrheit der Proben mit variabler Schäftung zu beobachten. Teilweise weist diese Klebschicht eine Dicke von über 200 µm auf, was sich vor allem auf die Ausrichtung der Lagen zueinander auswirkt.

Die Winkel der Schäftungen wurden nur punktuell gemessen. Im Rahmen der Messgenauigkeit konnte eine gute Übereinstimmung mit den im Probenprogramm festgelegten Winkeln festgestellt werden.

Generell sind die gemessenen Klebschichtdicken in der Tendenz zu dick. Die Proben mit einer konstanten Schäftung weisen alle eine mittlere Klebschichtdicke unter 200 µm auf und liegen damit noch im Bereich einer idealen Klebschichtdicke. Die Abweichung von der idealen Klebschichtdicke liegt zwischen 30 % (für die Proben QI1-K-1 und QI3-K-2) und 40 % (für den Probensatz QI1-K-2). Die Proben mit Lagenaufbau QI1 weisen eine geringe Standardabweichung auf (35 µm und 37,3 µm). Die des Probensatzes mit Lagenaufbau QI3 liegt höher (57,7 µm), da die Klebschichtdicke teilweise bis zu 246 µm beträgt. Trotz der leichten Abweichung von den Idealwerten dienen die geprüften Probekörper als gute Referenz für die Proben mit einer variablen Schäftung.

Die Proben mit variabler Schäftung und Lagenaufbau QI1 weisen, mit Ausnahme von QI-V-3, mittlere Klebschichtdicken im Bereich von 110-175 µm auf und liegen damit noch im Idealbereich. Die Probe QI-V-2 besitzt mit 66,5 µm die höchste Standardabweichung und einen entsprechend hohen Variationskoeffizienten. Die niedrigste Standardabweichung ist bei der Probe QI1-V-5 zu beobachten.

Die Proben mit Lagenaufbau QI3 und einer variablen Schäftung weisen große Unterschiede in der Fertigungsqualität auf. Bei den Proben QI3-V-1 und QI3-V-2 liegt die Klebschichtdicke deutlich über 200 µm, was ebenfalls zu hohen Standardabweichungen und Variationskoeffizienten führt.

Im Gegensatz dazu hat die Probe QI3-V-3 eine mittlere Klebschichtdicke von ca. 160 μm und eine niedrige Standardabweichung.

Die Proben für die Prüfung unter ETD-Bedingungen weisen mittlere Klebschichtdicken von unter 200 μm auf, besitzen jedoch hohe Standardabweichungen, die Probe QI1-100-V-1 überdies auch einen hohen Variationskoeffizienten. Dieser Werte spiegeln die stark variierende Klebschichtdicke wider.

6.5 Versuchsaufbau

Im folgenden Abschnitt werden die Prüfeinrichtung, die dazu verwendeten Hilfsmittel und das Prüfverfahren vorgestellt.

6.5.1 Prüfeinrichtung

Die Zugprüfung wird mit einer Zugprüfmaschine des Typs *Zwick 1484* durchgeführt. Diese ist mit einem Kraftaufnehmer für eine Zugbelastung bis max. 250 kN ausgestattet. Die Probe wird an der Ober- und Unterseite jeweils auf einer Länge von ca. 60 mm eingespannt. Der Probenhalter entspricht einem Keilzug und kann eine maximale Last von 150 kN aufnehmen. Die im Rahmen der geplanten Versuche zu erwarteten Lasten liegen deutlich darunter. Die freie, nicht-eingespannte Länge beträgt bei den Proben mit RTD-Bedingungen 160 mm. Durch das Anbringen der Heizmatten bei der ETD-Prüfung muss dieser Abstand für die entsprechenden Proben auf 170 mm erhöht werden. Die Zugprüfmaschine verfährt weggesteuert mit einem Vorschub von 2 mm pro Minute. Die Raumtemperatur des Prüflabors beträgt 23 °C, bei einer Luftfeuchtigkeit von 50 %.

6.5.2 Optisches Messsystem ARAMIS

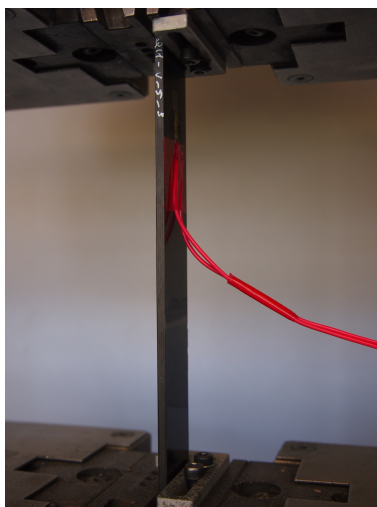
Für die Vermessung der Dehnungen im Schäftungsbereich steht das optische Messsystem *ARAMIS* des *Instituts für Faserverbundleichtbau und Adaptronik* zur Verfügung. Dieses System der Firma *GOM* ist ein berührungslos arbeitendes, optisches 3-D Verformungsmesssystem [GOM13]. Mithilfe von aufgenommenen Kamerabildern, können Dehnungen auf der Oberfläche der Proben während der Prüfung gemessen werden. Das System analysiert dabei die Verschiebung von quadratischen oder rechteckige Bildausschnitten, sog. *Facetten* zueinander. Die Probenoberfläche muss dazu ein stochastisches oder regelmäßiges Muster aufweisen, damit das System den einzelnen Facetten Bildpunkte zuordnen kann. Nach der Aufnahme der Bilder wird die Verschiebung der Facetten mithilfe einer Software berechnet. Anschließend sind mit einem Auswertungsprogramm umfangreiche Messungen verschiedener Dehnungswerte möglich.

Bei allen Proben eines Probensatzes mit der laufenden Endung -2 wird die Schnittfläche an der Probenkörperseite mit dem *ARAMIS*-System während der Zugprüfung vermessen. Vor der Messung muss für eine möglichst inhomogene Fläche ein stochastischen Farbsprühmuster aufgebracht werden. Die Aufnahme Frequenz der Bilder beträgt 0,25 Hz (ein Bild pro 4 Sekunden). Da keine 3D-Effekte zu erwarten sind, werden 2D-Aufnahmen mit nur einer Kamera gemacht. Um eine ausreichende Auflösung der Klebschicht zu erreichen, ist ausschließlich die Betrachtung der Hälfte des Schäftungsbereichs möglich.

6.5.3 Durchführung

Bis auf zwei Probensätze werden alle Proben bei RTD-Bedingungen geprüft. Wie bereits erwähnt wird jeder Probekörper vor der eigentlichen Prüfung vermessen und die ermittelten Maße werden in das Programm der Zugprüfmaschine eingegeben. Dies ist notwendig, um über die Probenfläche eine Auswertung der Spannungen durchzuführen. Alle erfassten Werte sind in einem Vermessungsprotokoll festgehalten, welches in Anhang B zu finden ist.

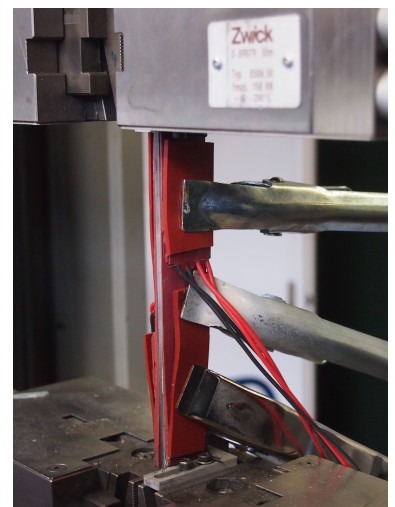
Abbildung 6.19 zeigt verschiedene, in die Prüfmaschine eingespannte Probekörper. In Abbildung 6.19 (a) ist eine Probe mit aufgeklebtem DMS dargestellt. Wird das in Abbildung 6.19 (b) abgebildete ARAMIS-System verwendet, muss eine Beschädigung der aufgetragenen Textur beim Einspannen in die Prüfmaschine unbedingt vermieden werden. Ein seitlich neben der eingespannten Probe aufgestelltes Lineal dient als Größenreferenz für die ARAMIS-Software.



(a) DMS



(b) ARAMIS



(c) Silikonmatten

Abbildung 6.19: Darstellung der verschiedenen Aufbauten während der Zugprüfung: (a) zeigt den Probekörper mit aufgeklebtem DMS, in (b) ist die Messung mit dem ARAMIS-System dargestellt und in (c) sind die auf der Probekörperoberfläche aufgetragenen Silikonheizmatten abgebildet.

Die Prüfung bei ETD-Umgebung erfolgt ähnlich bei den in Abschnitt 6.1.2 durchgeführten Voruntersuchungen. Abbildung 6.19 (c) zeigt die mithilfe der Federklemmen an der bereits eingespannten Probe befestigten Heizmatten. Die Thermografiekamera wird vor dem Probekörper platziert. Wie bereits erwähnt, ist für ein sicheres Anliegen der Heizmatten an den Probekörper eine erhöhte freie Länge von 170 mm erforderlich. Um die Wärmeableitung über die Stahlklemmen zu reduzieren, werden zusätzlich Silikonstreifen unter den Klemmen positioniert und ebenfalls eingespannt. Der Temperaturmesspunkt der Kamera wird auf einen Punkt in der Mitte der Schäftung gerichtet. Nach der Erwärmungszeit von 10 min wird die Temperatur an der Schnittfläche im Bereich der Schäftung gemessen und gegebenenfalls eine Regelung vorgenommen. Da, wie erwartet, die Temperaturverteilung bei jeder Prüfung eine andere Variation aufweist, beginnt die Zugprüfung sobald die mittlere Temperatur innerhalb des Schäftungsbereichs 100 ± 5 °C erreicht. Während der Prüfung werden die Silikonheizmatten an der Probe belassen und nach dem Bruch entfernt.

6.6 Ergebnisse der experimentellen Untersuchung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Zugprüfung vorgestellt. Es werden die über einen Proben-satz gemittelte durchschnittliche Versagenslast \bar{F}_{max} , die durchschnittliche Versagensspannung $\bar{\sigma}_M$, die Standardabweichung s , der Variationskoeffizient ν und der Elastizitätsmodul E aufgeführt. Der E-Modul wird über die Laminatdehnung der DMS-Probekörper ermittelt. Die Ergebnisse sind auf die zweite Dezimalstelle gerundet.

6.6.1 Prüfergebnisse Laminataufbau QI1

Eine Übersicht über die Ergebnisse der Zugversuche mit Laminataufbau QI1 zeigt Tabelle 6.2.

Den Werten der Tabelle ist zu entnehmen, dass, mit Ausnahme der Proben QI1-V-L, alle Probekörper mit einer variablen Schäftung eine höhere Versagensspannung aufweisen. Die Proben QI1-V-1 erreichen eine Zugfestigkeitssteigerung von 12,5 % gegenüber der vergleichbaren Probe mit konstanter Schäftung QI1-K-1. Im Vergleich zu Probe QI1-K-2 mit einer konstanten Schäftung und einem Schäftungsverhältnis von 1:20 steigern sich QI1-V-2 um 17,7 %, QI1-V-3 um 17,1 %, QI1-V-4 um 5,3 % und QI1-V-5 um 1 %. Die Zugfestigkeit der Proben mit der Schäftung QI1-V-L sinkt um 14,2 %. Die Proben QI1-V-1, QI1-V-2 und QI1-V-3 weisen signifikante Steigerungen der Zugfestigkeit gegenüber den vergleichbaren konstanten Schäftungen auf. Die Probe QI1-V-5 erreicht trotz einer Verkürzung der Reparaturlänge von 60 mm auf 38,5 mm (35,8 %) annähernd gleiche Festigkeitswerte. Nur die Probe QI1-V-4 zeigt eine geringe Steigerung gegenüber der konstanten Schäftung. Ein möglicher Grund dafür ist die Probenqualität. Wie in Abschnitt 6.4 beschrieben, weist dieser Probensatz eine große Variation der Klebschichtdicke auf. Diese liegt jedoch im selben Bereich wie bei den vergleichbaren variablen Proben QI1-V-2 und QI1-V-3. Zusätzlich weist diese Schäftungsgeometrie jedoch eine komplizierte Form auf, da jede Lage eine individuelle Winkeleinstellung besitzt. Eine kleine Abweichung in der Lagenausrichtung hat deshalb eine größere Auswirkung auf die Klebschichtdicke.

Tabelle 6.2 ist außerdem zu entnehmen, dass die Elastizitätsmoduln und damit die Steifigkeit der einzelnen Probekörper ähnliche Werte aufweisen. Damit ist eine Vergleichbarkeit der Versuche untereinander möglich.

Tabelle 6.2: Übersicht über die Ergebnisse der Zugprüfung aller Proben mit Laminataufbau QI1

Bezeichnung	Durchschnittliche Versagenslast	Durchschnittliche Versagensspannung	Standard-abweichung	Variations-koeffizient	Elastizitäts-modul
Formelzeichen	\bar{F}_{max}	$\bar{\sigma}_M$	s	ν	E
Einheit	kN	MPa	MPa	%	GPa
QI1-K-1	39,6	505,93	19,26	3,81	57,71
QI1-K-2	36,5	464,67	16,99	3,66	58,44
QI1-V-1	44,66	569,06	35,82	3,41	62,14
QI1-V-2	42,72	546,86	14,5	2,65	63,37
QI1-V-3	42,78	544,21	33,96	6,24	60,78
QI1-V-4	38,4	489,45	46,67	9,53	60,97
QI1-V-5	36,98	469,55	10,78	2,17	61,55
QI1-V-L	31,28	398,74	42,46	10,65	57,19

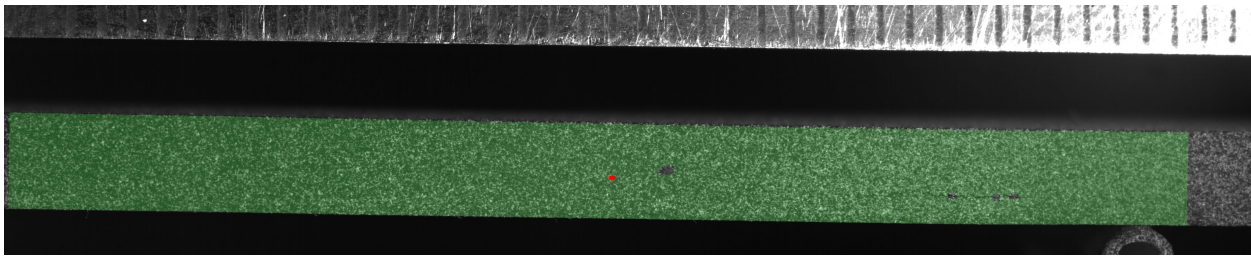
Bei allen Proben mit Lagenaufbau QI1 wurde vor dem Versagen eine im Laminat entstehende Delamination festgestellt. Abbildung 6.20 zeigt dies beispielhaft an der mithilfe des ARAMIS-Systems aufgenommenen Probe QI1-V-3. Die grüne Farbe auf der Oberfläche ist der auswertbare Messbereich. Deutlich ist zu erkennen wie die Delamination in Abbildung 6.20 (a) bei einer Last von ca. 32 kN entsteht und sich bis zum Versagen der Probe fortsetzt. Dabei wandert der Riss, wie in Abbildung 6.20 (b) dargestellt, durch die Klebschicht hindurch. Dadurch kommt es jedoch zu keinem frühzeitigen Versagen. In Abbildung 6.20 (c) und (d) ist zu erkennen, dass sich der Spalt zwischen den verbliebenen Probenhälften mit steigender Last aufweitet. Möglicherweise ist dies auf eine durch die Delamination entstehende Zug-Biegekopplung zurückzuführen, da in den entstandenen Probekörpern kein symmetrischer Laminataufbau mehr vorhanden ist. Bei einer Last von ca. 45 kN reißt die Probe. Der Zustand danach ist in Abbildung 6.20 (e) dargestellt.

Tabelle 6.3: Übersicht über den Beginn der Delamination bei den Proben mit Laminataufbau QI1

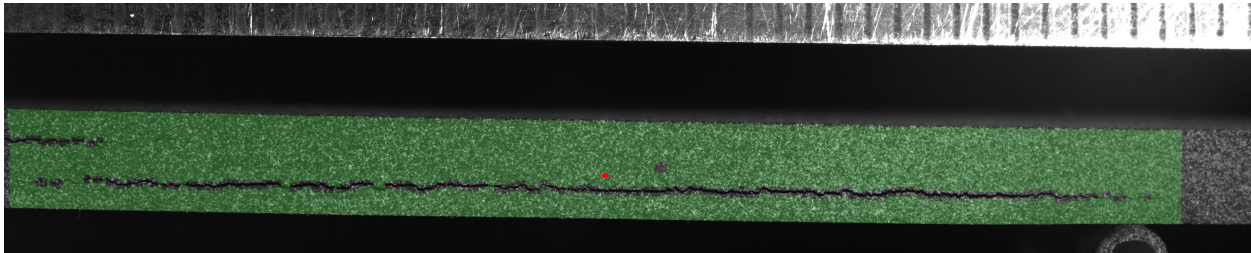
Bezeichnung	max. Last	Last bei Beginn der Delamination	Anteil Gesamtlast
Einheit	kN	kN	%
QI1-K-1	40,62	25,74	63,4
QI1-K-2	36,34	24,98	68,7
QI1-V-1	45,47	36,06	79,3
QI1-V-2	43,81	37,9	86,5
QI1-V-3	44,71	32,05	71,7
QI1-V-4	37,15	29,11	78,6
QI1-V-5	37,39	36,23	96,9
QI1-V-L	30,7	28,44	92,6

Bei den konstanten Proben beginnt die Delamination bei einem Anteil von 63,4 % (QI1-K-1) und 68,7 % (QI1-K-2) der Versagenslast. Bei den Proben mit einer variablen Schäftung beginnen die Delaminationserscheinungen später. Bei Probe QI1-V-3 liegt der Beginn bei 71,7 %, QI1-V-4 bei 78,4 %, QI1-V-1 bei 79,3 %, QI1-V-2 bei 86,5 % und bei QI1-V-5 bei 96,9 %. Die ermittelten Werte dienen zum quantitativen Vergleich der Proben, da die Auswertung aus den Bildern des ARAMIS-Systems durchgeführt wurde. Da diese mit einer Frequenz von 0,25 Hz aufgenommen wurden, ist eine Abweichung vom wahren Beginn der Delamination möglich. Eine Zusammenfassung der Auswertung des Delaminationsbeginns ist in Tabelle 6.3 zu finden. Die Delamination beginnt in allen Probekörpern in den doppelten 90°-Lagen. Es ist daher von Zwischenfaserbruch auszugehen. Dies ergab eine Auswertung der Delaminationsposition über der Probenbreite. Solche doppelten Lagen sind in Lagenaufbau QI1 in drei Bereichen über der Probenhöhe zu finden.

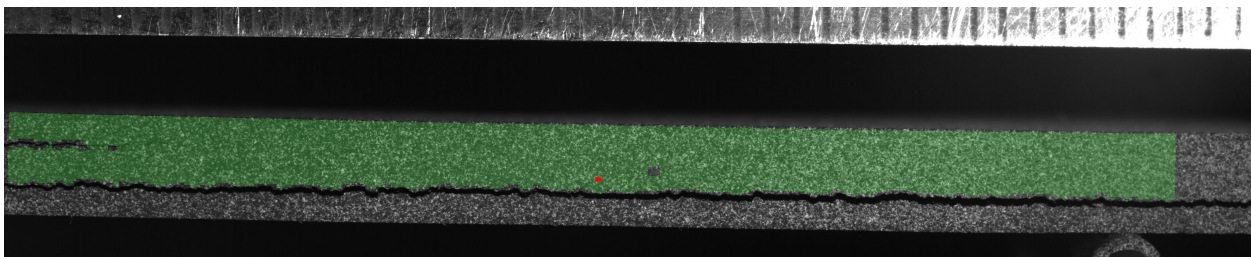
In Abbildung 6.21 sind beispielhaft die Bruchflächen einer konstanten und einer variablen Schäftung dargestellt. Abbildung 6.21 (a) zeigt das Schadensbild der Probe QI1-K-2. Auf beiden Fügeteilhälften sind Klebstoffreste erkennbar. Es ist daher größtenteils von kohäsives Versagen auszugehen. Dennoch sind auch Anteile von Laminatversagen zu beobachten. Die ausgefranzten Fasern zeigen eine $\pm 45^\circ$ -Ausrichtung. Die Bereiche in denen Klebstoffreste vorhanden sind, können den 0°-Lagen zugeordnet werden. Über diese Lagen wird der Großteil der Last an die Klebschicht übertragen. Da der lokale Schäftungswinkel (ca. $2,86^\circ$) jedoch größer als der für eine ausreichende Klebstofffestigkeit ideale Winkel von ca. 1° ist, wird dort zuerst Versagen auftreten. Die Last wird daraufhin in die $\pm 45^\circ$ und 90°-Lagen umgelagert, welche aufgrund der geringeren Zugfestigkeit versagen. In Abbildung 6.21 (b) ist das Bruchbild der Probe QI1-V-2 dargestellt. Bei dieser Probe sind keine



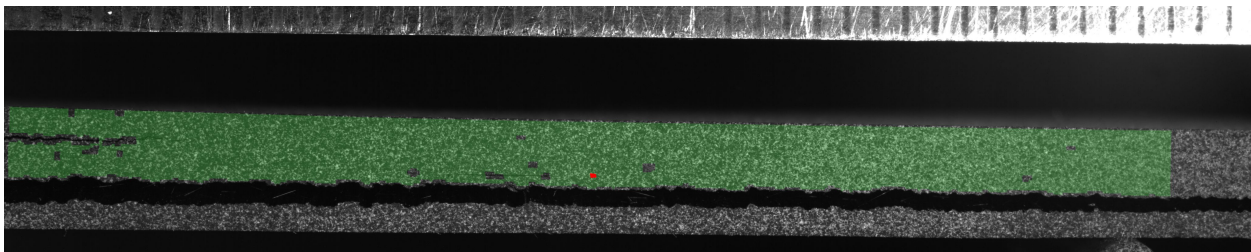
(a) Beginn der Delamination (Last 32,05 kN)



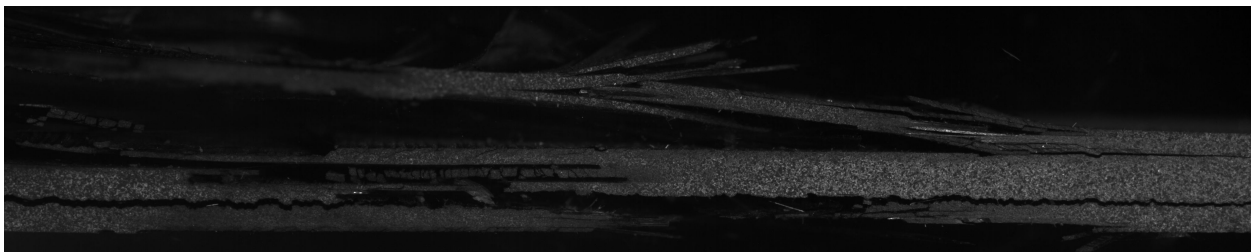
(b) Delaminationsfortschritt durch die Klebschicht (Last 36,65 kN)



(c) Aufweitung des Risses (Last 41,3 kN)



(d) Die Probe kurz vor Versagen (Last 44,71 kN)



(e) Riss der Probe

Abbildung 6.20: Die mithilfe des ARAMIS-Systems erstellten Aufnahmen zeigen den Delaminationsfortschritt bei fünf verschiedenen Laststufen in der Probe QI1-V-3. Der Bildbereich deckt ca. den halben Schäftungsbereich ab.

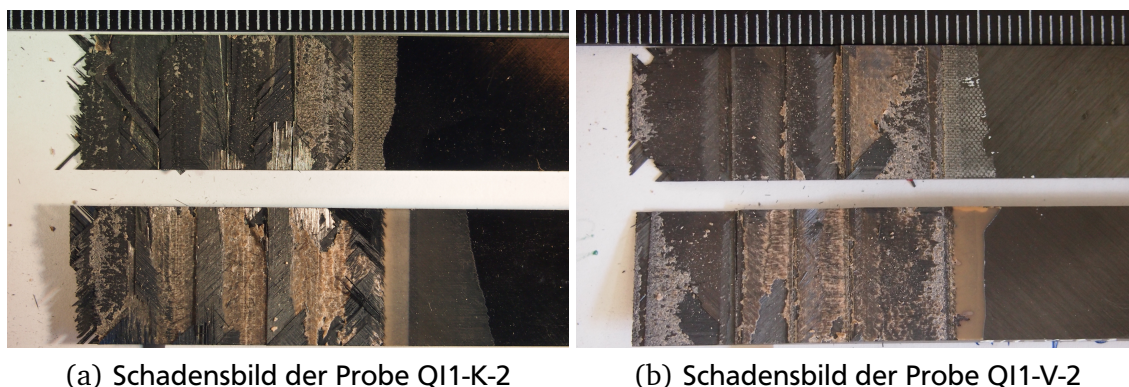


Abbildung 6.21: Beispielhafte Schadensbilder zweier Proben mit Laminataufbau QI1: Bei der in (a) gezeigten konstanten Schädigung ist von einer Mischung aus Klebschicht- und Laminatversagen auszugehen. Die in (b) gezeigte variable Schädigung zeigt ein reines Klebschichtversagen.

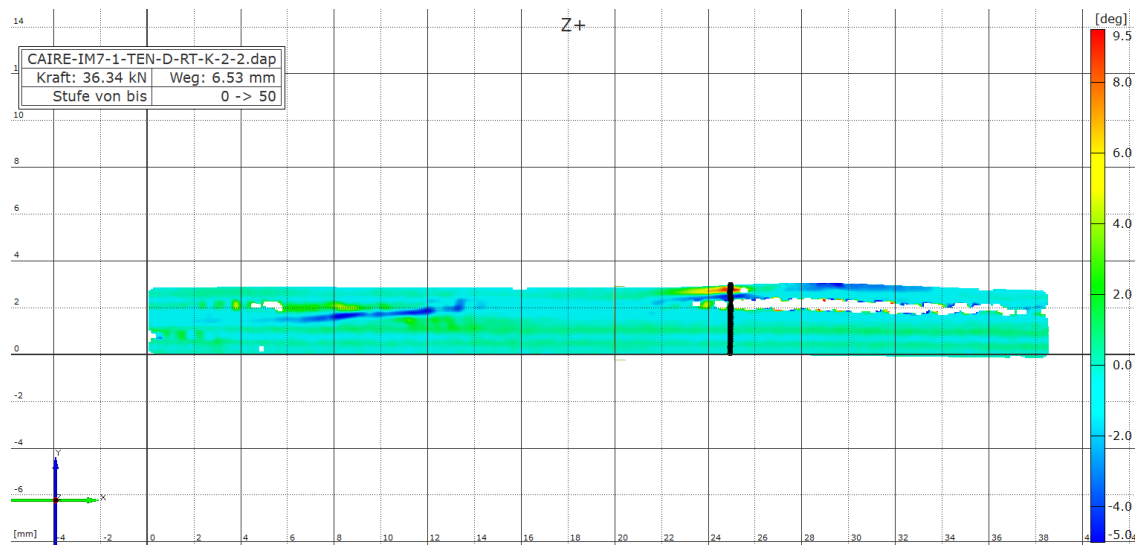
ausgefranzten Fasern zu erkennen. Das Schubspannungsniveau ist gleichmäßig in der Klebschicht verteilt. Ein entstehender Riss wandert daher im Klebstoff weiter und es ist von einem reinen kohäsiven Klebschichtversagen auszugehen. Die Bruchflächen der restlichen Proben zeigen ähnliche Eigenschaften wie die zuvor aufgeführten Beispiele.

Um die versagensrelevanten Dehnungen der Klebschicht zu ermitteln wurden die Scherwinkel γ_{xy} über alle Laststufen für die Proben QI1-K-2 und QI1-V-2 mit der ARAMIS-Software analysiert. Der Scherwinkel gibt wiederum einen Aufschluss über die vorliegende Verzerrung. Die in Abschnitt 4.2.2 vorgestellten Klebstoffparameter zeigen eine maximale Scherung von $\gamma_{ult}=0,17$. Die Umrechnung in Grad mit der Formel

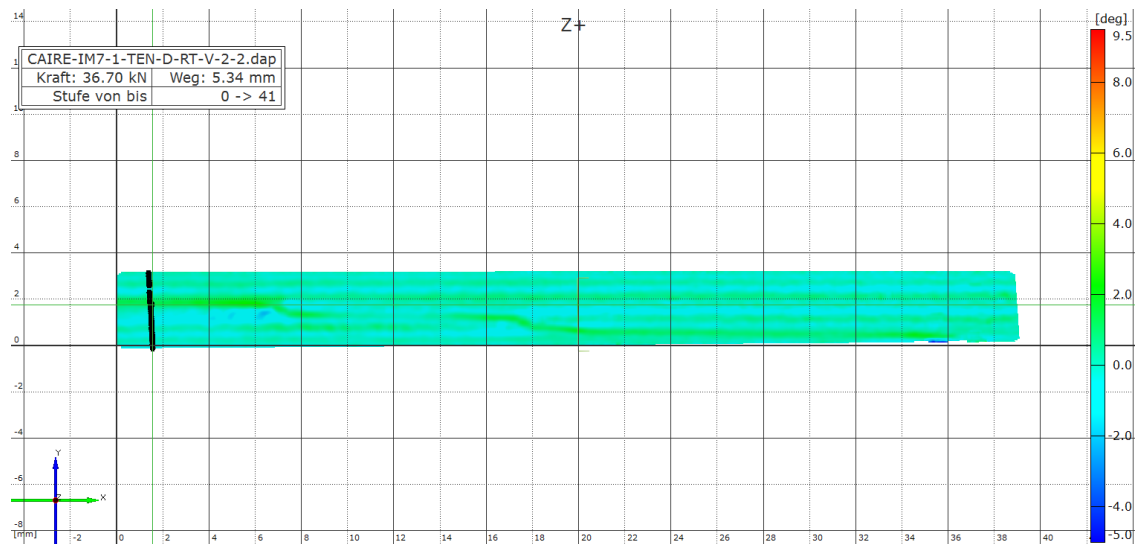
$$\text{Grad} = \text{Radiant} \cdot \frac{180}{\pi} \quad (6.2)$$

ergibt einen Versagen-Scherwinkel von ca. $9,5^\circ$. An dieser Stelle soll erwähnt werden, dass die qualitative Überprüfung des Klebschichtversagens über eine Versagensdehnung mithilfe des ARAMIS-Systems nicht zuverlässig ist. Dies liegt an der möglicherweise unzureichenden Auflösung der im Gegensatz zum Gesamtbild klein dimensionierten Klebschicht und der Ungenauigkeit des aufgesprühten stochastischen Musters. Außerdem entspricht die in der ARAMIS-Software berechnete Dehnung einer Mittelung der umliegenden Facetten. Es wird der gesamte Umgebungsbereich einbezogen, d.h. die Werte sind „verschmiert“. Mögliche Extrema sind daher nicht immer eindeutig quantitativ bestimmbar. Dennoch ist die Messung für einen qualitativen Vergleich der verschiedenen Schädigungsgeometrien untereinander ausreichend.

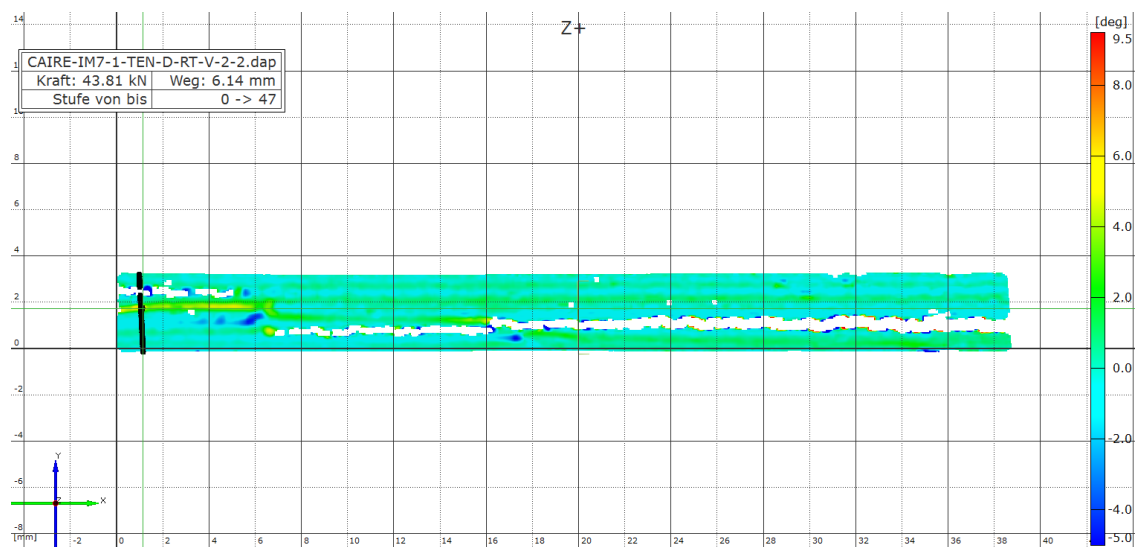
In Abbildung 6.22 wird das Dehnungsverhalten der Proben QI1-K-2 und QI1-V-2 gegenübergestellt. Abbildung 6.22 (a) zeigt die Scherwinkel der Probe QI1-K-2 kurz vor Versagen bei einer Last von 36,34 kN. Deutlich ist die Delamination auf der rechten Seite zu erkennen. Der höchste Scherwinkel tritt jedoch in der darüber liegenden Klebschicht auf. Der dort vorherrschende Scherwinkel von ca. $9,4^\circ$ entspricht in etwa der in den Werkstoffdaten maximal möglichen Verzerrung. Bei annähernd gleicher Last stellen sich in Probe QI1-V-2 geringere Scherwinkel ein. Diese liegen bei max ca. 4° , wie in Abbildung 6.22 (b) dargestellt. Die Probe versagt schließlich bei einer Laststufe von 43,81 kN. Abbildung 6.22 (c) zeigt, dass die maximalen Scherwinkel ca. $6,5^\circ$ betragen. Bei beiden Proben kann beobachtet werden, dass trotz der schon vorhandenen Delamination das Versagen von der Klebschicht ausgeht. In Abbildung 6.23 ist der Schnitt entlang der in Abbildung 6.22 gezeigten schwarzen Linien dargestellt. Für die Probe QI1-K-2 (Abbildung 6.22 (a)) zeigt die Unterbrechung



(a) Dehnungen in Probe Q1-K-2 kurz vor Versagen (Last 36,34 kN)



(b) Dehnungen in Probe Q11-V-2 (gleicher Lastschritt)



(c) Probe Q11-V-2 kurz vor Versagen (Last 43,81 kN)

Abbildung 6.22: Vergleich der Scherwinkel der Proben Q1-K-2 und Q11-V-2 mithilfe des ARAMIS-Systems

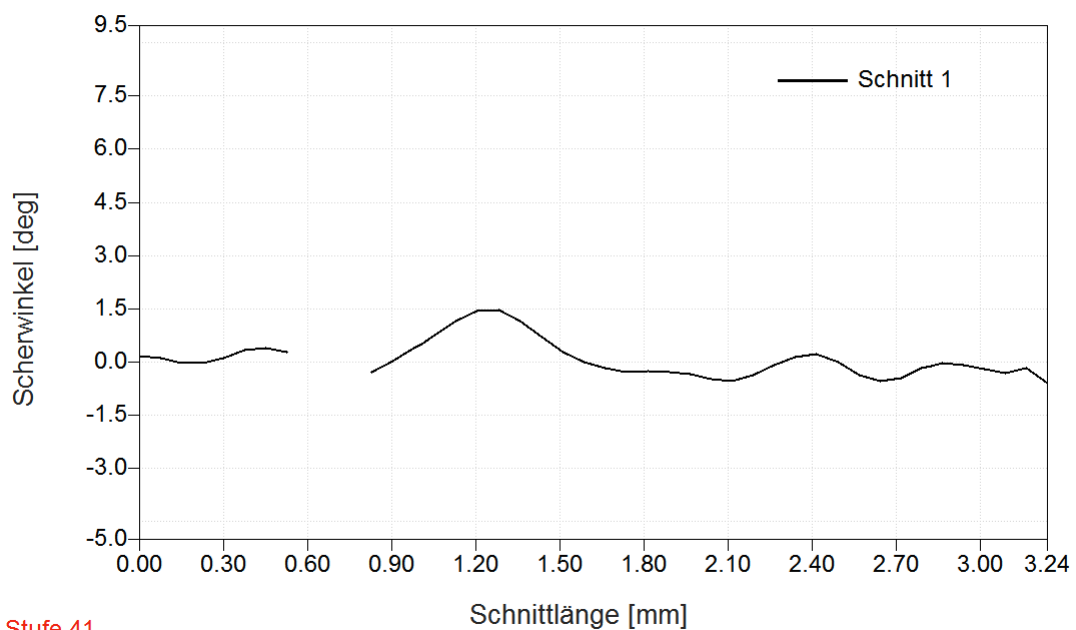
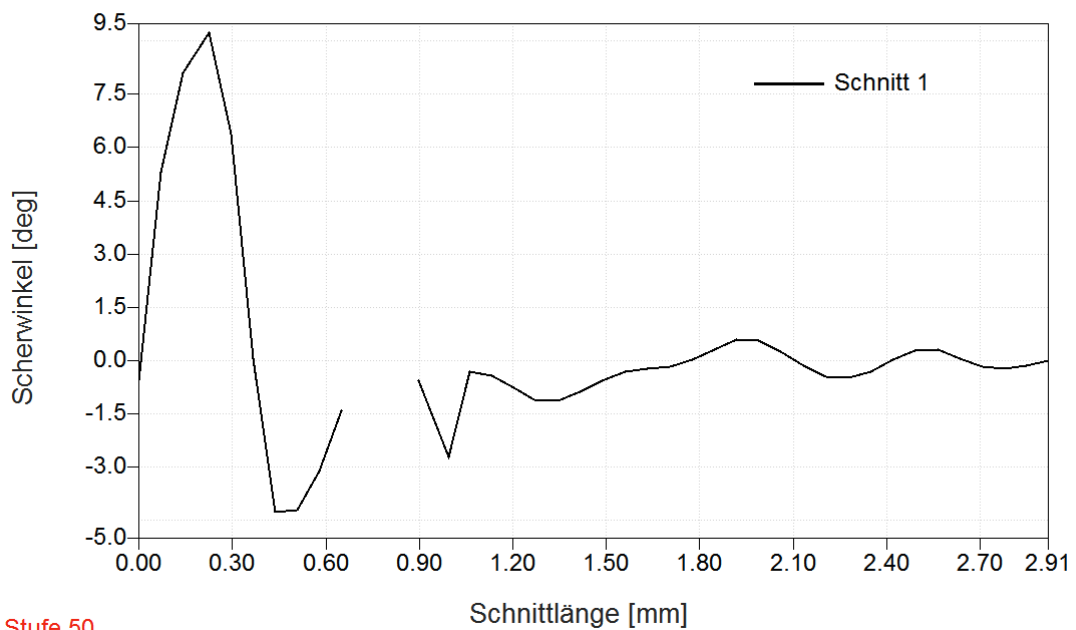


Abbildung 6.23: Vergleich der über der Probenhöhe aufgetragenen Scherwinkel der Proben QI1-K-2 und QI1-V-2 bei gleichen Laststufen

im Verlauf die Delamination. An der Position über entlang der Probenbreite ist zu erkennen, dass es sich um die doppelten 90°-Lagen handelt. Das Maximum im Scherwinkelverlauf stellt die Scherung in der Klebschicht kurz vor Versagen dar. Abbildung 6.23 (b) zeigt einen Schnitt durch die Probe QI1-V-2 an der Position des späteren Versagens. Deutlich ist zu erkennen, dass bei gleichem Lastschritt eine geringere Dehnung der Klebschicht vorherrscht.

6.6.2 Prüfergebnisse Laminataufbau QI3

Tabelle 6.4 zeigt eine Übersicht der Zugprüfergebnisse der Proben mit Laminataufbau QI3.

Tabelle 6.4: Übersicht über die Ergebnisse der Zugprüfung aller Proben mit Laminataufbau QI3

Bezeichnung	Durchschnittliche Versagenslast	Durchschnittliche Versagensspannung	Standard- abweichung	Variations- koeffizient	Elastizitäts- modul
Formelzeichen	\bar{F}_{max}	$\bar{\sigma}_M$	s	ν	E
Einheit	kN	MPa	MPa	%	GPa
QI3-K-2	38,32	487,61	28,19	5,78	61,69
QI3-V-1	38,16	485,51	14,32	2,95	57,2
QI3-V-2	42,78	544,48	20,09	3,69	61,48
QI3-V-3	53,18	678,46	16,83	2,48	63,47

Gegenüber der Probe QI3-K-2 mit einer konstanten Schäftung weisen die Proben QI3-V-2 eine Steigerung der Zugfestigkeit um 10,4 % und QI3-V-3 um 39,1 % auf. Die Proben des Satzes QI3-V-1 versagen hingegen um 0,4 % früher. Auffällig ist, dass es bei Probe QI3-V-1 zu einem früheren Versagen als bei der konstanten Schäftung kommt, obwohl diese Schäftungsgeometrie eine Reparaturlänge von 70 mm aufweist. Der Probensatz QI3-V-3 zeigt die höchste Steigerung der Zugfestigkeit von allen durchgeführten Versuchen. Der Grund hierfür liegt möglicherweise in der Fertigungsqualität der Proben. Wie bereits in Abschnitt 6.4 beschrieben, wurde bei den Proben QI3-V-1 und QI3-V-2 die konstante Klebschichtdicke nicht erreicht. Dies spiegelt sich in den hohen mittleren Klebschichtdicken und Standardabweichungen wider. Besonders die Probe QI3-V-1 weist durch eine falsche Ausrichtung der Fügepartner Fehlstellen im Klebspalt, zueinander verschobene Lagen und Bereiche mit großen Klebschichtdicken auf. Bei Probe QI3-V-2 sind diese Faktoren nicht im gleichen Maße ausgeprägt, jedoch ebenfalls vorhanden. Dies erklärt die Steigerung der Zugfestigkeit um ca. 10 %. Die Proben QI3-V-3 hingegen weisen anhand der gering vom idealen Maß abweichenden mittleren Klebschichtdicke und der geringen Standardabweichung eine gute Fertigungsqualität auf. Dies spiegelt sich auch in den Prüfergebnissen wider.

Die Elastizitätsmoduln liegen im selben Wertebereich wie bei Laminataufbau QI1. Die Vergleichbarkeit beider Laminattypen ist daher aufgrund der annähernd gleichen Steifigkeiten legitim.

Im Gegensatz zu den Proben mit Laminataufbau QI1 wurde nur in Probensatz QI3-V-2 eine vorzeitige Delamination festgestellt. Diese beginnt bei einem Lastanteil von 77,8 % der Versagenslast. Da nur eine Probe pro Probensatz mit dem ARAMIS-System vermessen wurde, kann dies bei anderen Proben des gleichen Satzes jedoch nicht ausgeschlossen werden.

In Abbildung 6.24 sind beispielhaft die Schadensbilder der Probe QI3-K-2 und QI3-V-2 dargestellt. Wie bei den Proben mit Laminataufbau QI1 ist bei der konstanten Schäftung einerseits kohäsives Versagen der Klebschicht und vereinzelt Laminatversagen zu beobachten. Vor allem im Randbereich

ist ein Riss der Probe senkrecht zur Lasttrichtung zu beobachten. Auch hier lag die Festigkeit der Klebschicht über jener der $\pm 45^\circ$ - und 90° -Lagen, wodurch besonders diese Fasern auf der Bruchfläche sichtbar sind. Bei der variablen Schäftung sind auf beiden Bruchflächen Klebstoffreste zu erkennen. Diese bedeutet, dass es sich fast ausschließlich um kohäsives Versagen handelt. Auch bei dieser Probe kommt es im äußeren Probenkörperbereich zu Laminatversagen.

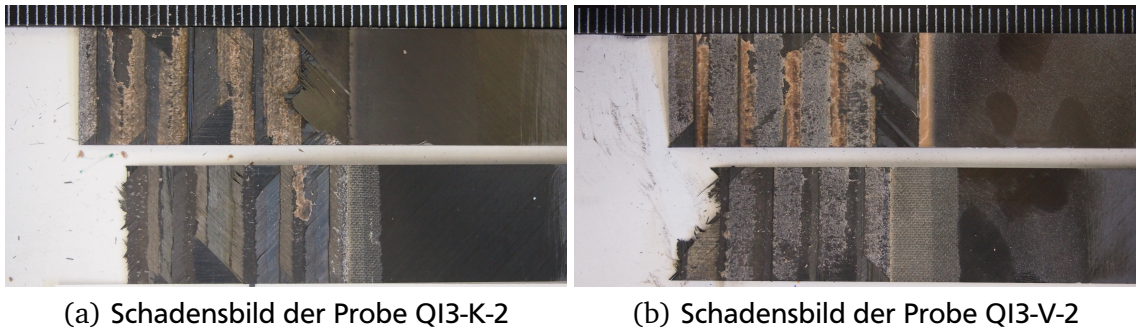
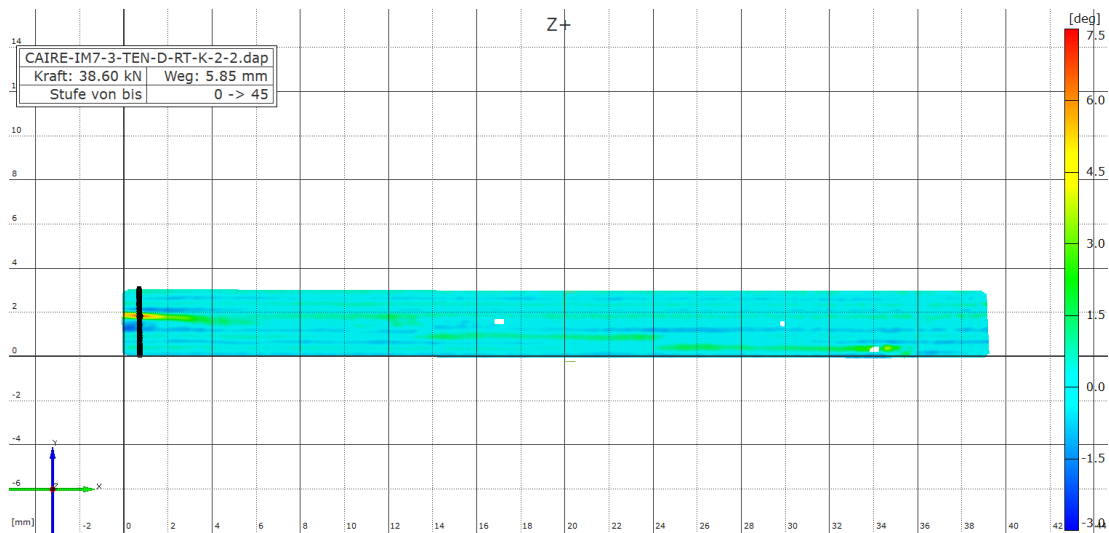
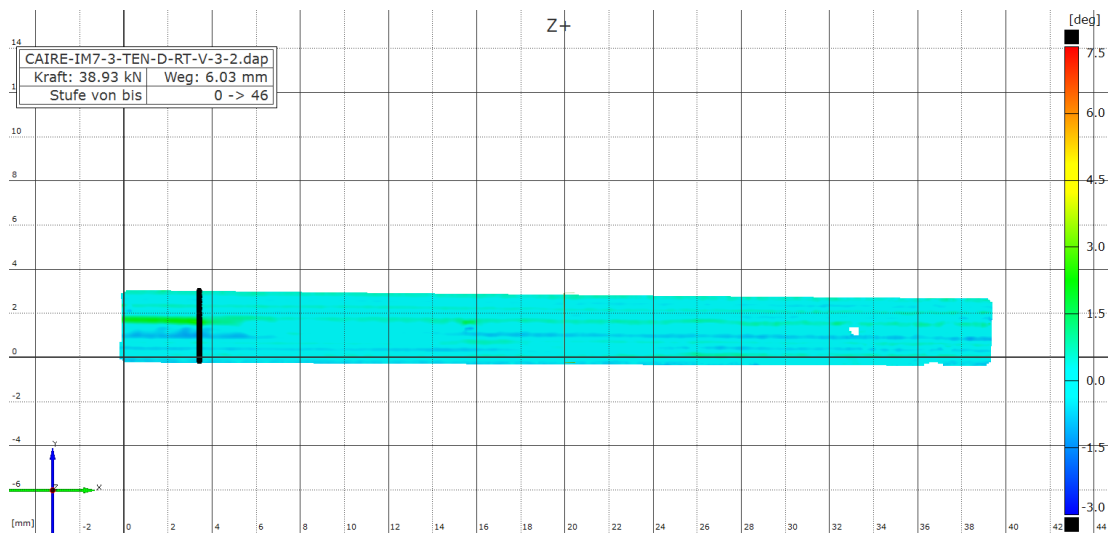


Abbildung 6.24: Beispielhafte Schadensbilder zweier Proben mit Laminataufbau QI3. Beide Bruchflächen zeigen kohäsives Versagen der Klebschicht und Laminatversagen.

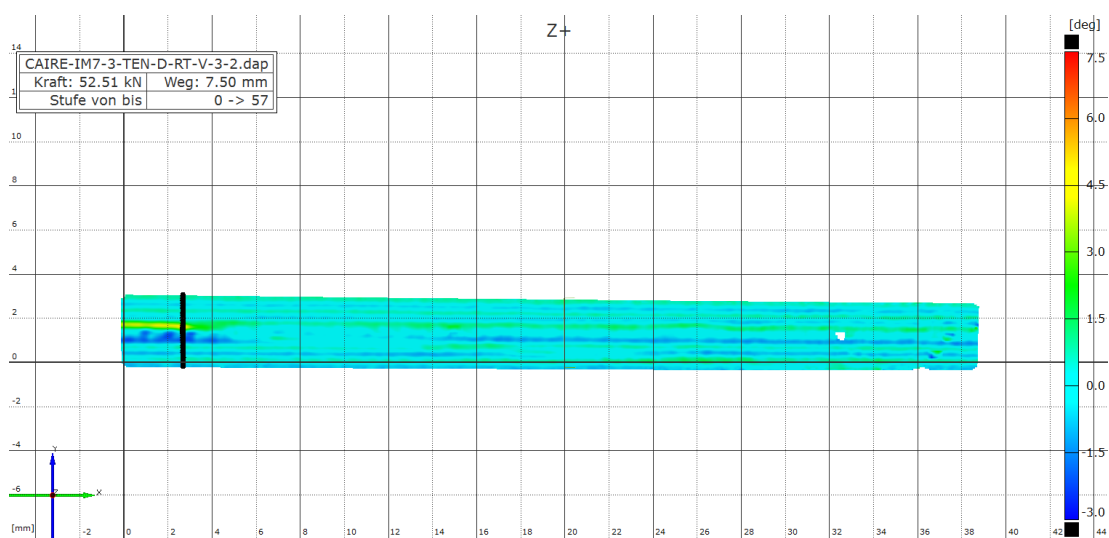
Für einen Vergleich der Dehnungen in konstanter und variabler Klebschicht werden die Proben QI3-K-2 und QI3-V-3 miteinander verglichen. Die Abbildungen 6.25 (a) und (b) zeigen einen Vergleich der vorherrschenden Scherwinkel bei annähernd gleicher Laststufe von ca. 38,6 kN. Deutlich ist zu erkennen, dass sich in Probe QI3-K-2 eine höhere Dehnung innerhalb der Klebschicht einstellt. Anhand der grünlichen Färbung erkennt man ebenfalls die komplette Klebschicht und eine höhere Dehnung als das umgebene Laminat. Bei Probe QI3-V-3 ist die Dehnung bei gleichem Lastschritt gering und große Scherwinkel sind nicht zu erkennen. Erst beim letzten Lastschritt, kurz vor Versagen, tritt eine deutliche Klebschichtdehnung auf. An den beiden Stellen des Versagens wurden außerdem die lokalen Dehnungen mithilfe eines Schnitts durch die Probe ermittelt. Diese sind in Abbildung 6.26 dargestellt. Der maximale auftretende Scherwinkel bei Probe QI3-K-2 beträgt ca. 6° , bei gleicher Laststufe in Probe QI3-V-3 nur ca. $2,8^\circ$. Vor dem Versagen wird ein Wert von $4,5^\circ$ erreicht. Die ermittelten Werte liegen bei Versagen deutlich unter dem theoretisch möglichen Wert. Wie bereits beschrieben ist die Auswertung per ARAMIS-Software jedoch vorrangig für eine qualitative Beurteilung einsetzbar.



(a) Dehnungen in Probe Q13-K-2 kurz vor Versagen (Last 36,34 kN)

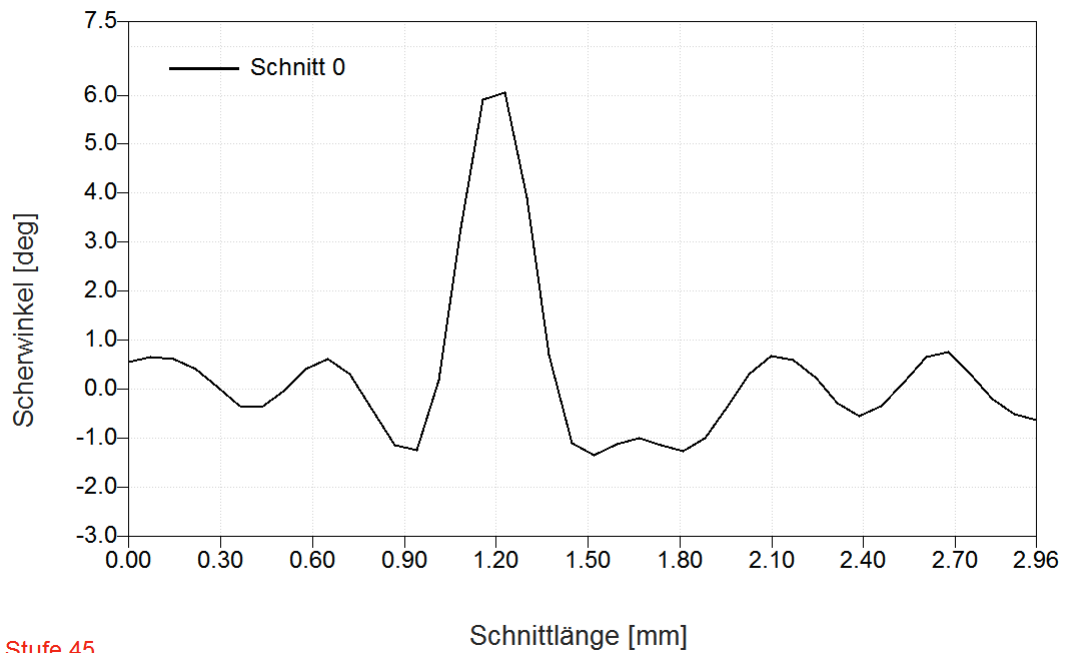


(b) Dehnungen in Probe Q13-V-3 (gleicher Lastschritt)



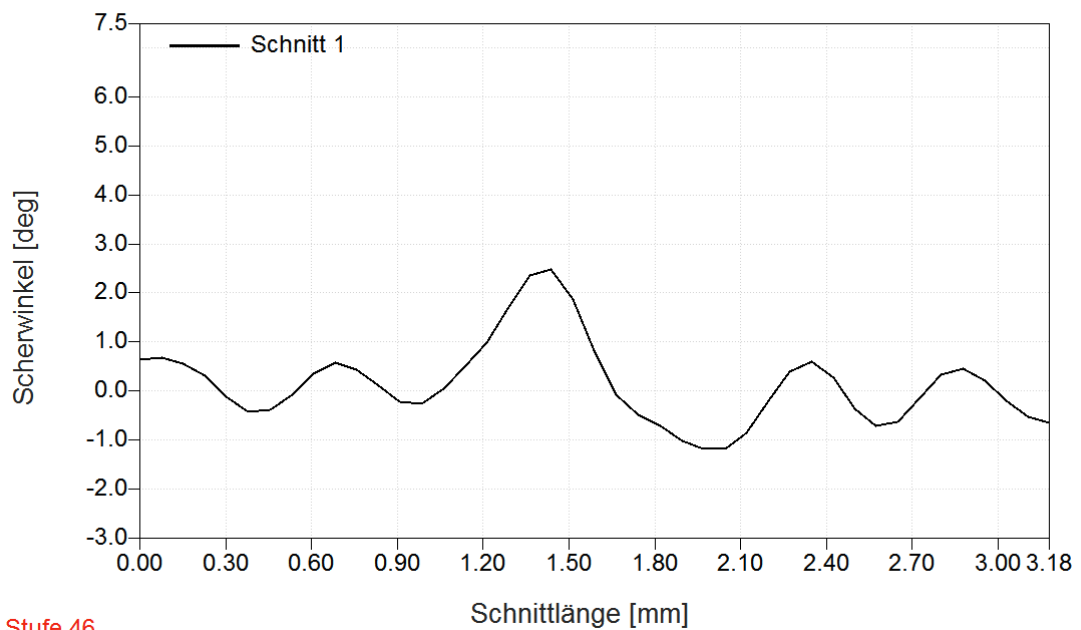
(c) Probe Q13-V-3 kurz vor Versagen (Last 43,81 kN)

Abbildung 6.25: Vergleich der Scherwinkel der Proben Q13-K-2 und Q13-V-3 mithilfe des ARAMIS-Systems



Stufe 45

(a) Die über der Probenhöhe aufgetragene Dehnung in Probe QI3-K-2 kurz vor Versagen (Last 36,34 kN)



Stufe 46

(b) Die Dehnungen über der Probenhöhe in Probe QI3-V-3 (gleicher Lastschritt)

Abbildung 6.26: Vergleich über der Probenhöhe aufgetragenen Scherwinkel der Proben QI3-K-2 und QI3-V-2 bei gleichen Laststufen

6.6.3 Prüfergebnisse bei ETD-Bedingungen

Die Ergebnisse der Zugprüfung mit den durch die Silikonmatten erwärmten Proben werden in Tabelle 6.5 aufgezeigt. Die mittlere Versagensspannung der Probe mit einer variablen Schäftung QI1-100-V-1 liegt um 1,3 % unter der mit einer konstanten Schäftung QI1-100-K-1. Wie in Abschnitt 6.4 beschrieben, weisen beide Proben eine hohe Standardabweichung auf. Vor allem bei Probe QI1-100-V-1 berühren sich die beiden Fügepartner in manchen Bereichen, wodurch keine messbare Klebschicht vorhanden ist. Die Lagen liegen außerdem nicht fluchtend zueinander. Durch die unzureichende Probenqualität des Satzes QI1-100-V-1 ist keine fundierte Aussage zum Einfluss der aufgetragenen Temperatur möglich.

Tabelle 6.5: Übersicht über die Ergebnisse der Zugprüfung aller Proben bei ETD-Bedingungen

Bezeichnung	Durchschnittliche Versagenslast	Durchschnittliche Versagensspannung	Standardabweichung	Variationskoeffizient	Elastizitätsmodul
Formelzeichen	\bar{F}_{max}	$\bar{\sigma}_M$	s	ν	E
Einheit	kN	MPa	MPa	%	GPa
QI1-100-K-1	36,98	469,55	30,78	6,55	59,33
QI1-100-V-1	36,37	463,31	35,82	7,73	57,47

Beide Proben zeigen erste Delaminationen vor dem endgültigen Versagen der Probe. Dies geschieht in beiden Fällen bei ca. 40 % der Maximallast.

Tabelle 6.6: Übersicht über den Beginn der Delamination der Proben bei RTD-Bedingung

Bezeichnung	max. Last	Last bei Beginn Delamination	Anteil Gesamtlast
Einheit	kN	kN	%
QI1-100-K-1	39,53	27,5	43,7
QI1-100-V-1	37,05	26,13	41,8

6.6.4 Vergleich der Zugprüfungsergebnisse und Schlussfolgerung

Wie bereits in den Kapiteln 2 und 3 angedeutet, zeigen Strukturklebungen eine Streuung bezüglich der Festigkeit. Dies trifft nach Auswertung der Zugversuche auch auf die variablen Schäftungen zu. Dennoch konnte gezeigt werden, dass die variablen Schäftungsgeometrien tendenziell höhere Versagenswerte erreichen als die vergleichbaren konstanten Schäftungen.

Alle Probekörper mit einer variablen Schäftung erreichen, bis auf QI1-V-L und QI3-V-1, eine höhere Festigkeit gegenüber den vergleichbaren konstanten Schäftungsgeometrien. In Abbildung 6.27 sind nochmals die ermittelten Versagensspannungen zum Vergleich graphisch dargestellt. Wie schon bei den Vorversuchen zu beobachten, weist Laminataufbau QI3 insgesamt höhere Zugfestigkeiten als QI1 auf. Dies ist sowohl bei den konstanten, als auch bei den variablen Schäftungen zu beobachten. Die Ursache dafür liegt in den doppelt vorhandenen 0°-Lagen bei Laminataufbau QI1, welche die Last konzentrieren und damit zu einem früheren Versagen beitragen.

Die Versuche mit erhöhter Prüftemperatur von 100 °C zeigen eine Festigkeitsminderung durch von ca. 7,7 %. Dies ergibt ein Vergleich der Proben mit der konstanten Schäftung QI1-K-1 und

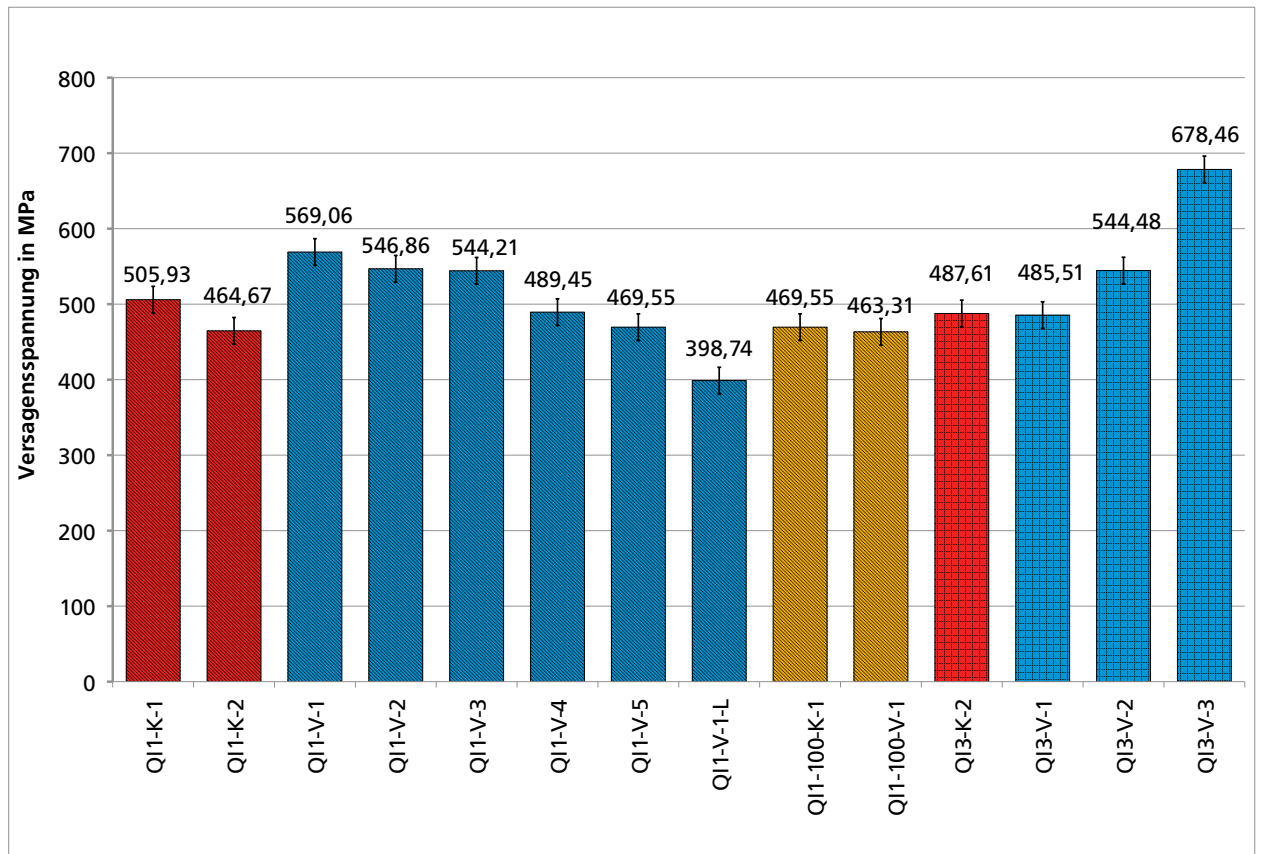


Abbildung 6.27: Graphischer Vergleich der Versagensspannungen aller durchgeführten Zugversuche

Q11-100-K-1. Der festigkeitsmindernde Einfluss von erhöhter Temperatur ist nachweisbar, fällt jedoch geringer aus als erwartet. Der Nachweis einer Festigkeitssteigerung durch eine variable Schäftung bei Zugversuchen unter ETD-Bedingungen war hingegen nicht möglich.

In Bezug auf die auftretenden Delaminationen zeigt der Lagenaufbau QI1 eine größere Anfälligkeit als Laminat QI3. Dies liegt an den doppelten 90°-Lagen, die besonders anfällig gegenüber Zwischenfaserbruch sind. Wie in der Auswertung gezeigt, tritt bei den Proben mit Laminataufbau QI3 nur in einem Probensatz Delamination auf.

Da die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Probekörper in dieser Form zuvor noch nicht gefertigt wurden, zeigen sich viele Aspekte, die in der Zukunft zu beachten sind. Wie bereits für die einzelnen Proben beschrieben hat die Probekörperqualität einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse der Zugversuche. Proben mit einer mittleren Klebschichtdicke von ca. 100–200 μm erreichen gute Zugfestigkeitswerte. Auch die Standardabweichung und der Variationskoeffizient sollten so gering wie möglich ausfallen. Dies ist jedoch aufgrund des Einflusses des Vakuumaufbaus auf die Klebschichtdicke an den äußeren Lagen schwer zu realisieren. Wie Teile des Probensatzes mit Lagenaufbau QI3 und die Proben der ETD-Prüfung zeigen, werden geringe Festigkeiten erreicht, wenn diese Bedingungen nicht erfüllt sind. Die Ergebnisse zeigen auch, dass der Einfluss einer Verschiebung der Lagen zueinander auf die Höhe des Versagens eine geringe Auswirkung hat. Daraus kann geschlossen werden, dass bei der Probenfertigung der Fokus vor allem auf der richtigen Einstellung der Klebschichtdicke liegen muss.

Des Weiteren wirkt sich das Problem des Herausdrückens von Klebstoff aus der Klebschicht auf die Probenqualität aus. Dadurch kommt es vor allem zur vertikalen Verschiebung der Fügepartner zueinander. Alle Proben zeigten zudem größere Bereich mit einer zu großen Klebschichtdicke und die inkorrekte Ausrichtung der Probekörperhälften in x-Richtung zueinander.

Aufgrund der gemachten Erfahrungen sind für zukünftige Projekte folgende Verbesserungen anzustreben:

- Zur Verminderung des Einflusses durch den Vakuumaufbau auf die Klebschichtdicke im Bereich der Oberseite der Proben ist eine Verklebung ohne Grundplatte, d.h. nur mit einem Vakuumsack, zu prüfen.
- Teilweise bildete aus dem Klebspalt austretender Klebstoff eine Klebschicht zwischen Platte und Probekörper, mit der Folge einer sich einstellenden Verschiebung beider Fügepartner in globaler x-Richtung. Zur Minderung dieses Effektes ist zu untersuchen, inwiefern ein genaueres Zuschneiden des Filmklebstoffs Auswirkungen auf den Klebstoffaustritt hat. Auch die zuvor genannte Fertigung der Proben ausschließlich mit einem Vakuumsack würde eine Verbesserung dieses Problems ermöglichen. Dabei muss geprüft werden, ob die Fügepartner korrekt und ohne Versatz zueinander ausgerichtet werden können.
- Bei allen Probekörpern wurde die angestrebte Klebstoffdicke von 0,13 mm überschritten. Um dies zu verhindern, sollten Versuche mit verschiedenen Klebstofffüllstoffen durchgeführt werden.
- Die Verschiebung einiger Probenhälften zueinander ist möglicherweise auf eine inkorrekte Position der Bohrungen für die Fixierungstifte zurückzuführen. Die Bohrlöcher müssen daher exakt gesetzt werden. Dabei muss ebenfalls auf die korrekte Position der Probenplatte auf dem Tisch der Fräse geachtet werden.
- Die Einstellung eines konstanten Temperaturfeldes mit Silikonmatten ist nur unzureichend möglich. Die liegt am variierenden Temperaturfeld der Matten und der unzureichenden Temperaturregelung. Aufgrund der geringen Probendicke und das Verdecken der Probenoberflächen ist die Überprüfung mithilfe der Thermografiekamera zu ungenau. Eine Lösung wäre eine berührungslose Erwärmung der Proben, beispielsweise mit Heizstrahlern. Damit wäre einerseits eine gleichmäßige Temperatureinwirkung sicher gestellt und andererseits eine Prüfung der Oberflächentemperatur von außen mit der Thermografiekamera auf allen Flächen möglich. Bei der Auswertung mithilfe des ARAMIS-Systems wären keine störenden Komponenten im Sichtfeld vorhanden.

Die hier aufgezeigten Maßnahmen tragen potentiell zur Verbesserung der Couponprobenqualität bei und sollten anhand von Versuchsreihen verifiziert werden.

7 Auswertung und Vergleich

Die Ergebnisse der numerischen und experimentellen Untersuchung wurden bereits im einzelnen vorgestellt. In diesem Kapitel sollen beide miteinander verglichen werden, soweit dies möglich ist. Abbildung 7.1 zeigt eine Übersicht über die aus der FE-Analyse und den Zugversuchen ermittelten Versagensspannungen für die im Probenprogramm aufgeführten Probengeometrien. Die linken Balken stellen die Ergebnisse der Simulationen dar, die rechte Seite die Versagensspannung der Probekörper aus den Zugversuchen. In Abbildung 7.2 sind die prozentualen Abweichungen der experimentellen Zugversuche von der Versagensvorhersage durch die FEM zueinander dargestellt. Generell ist ein quantitativer Vergleich beider Untersuchungen nur bedingt möglich. Das numerische Modell ist ideal aufgebaut, berücksichtigt keine Fehlstellen des Laminats oder der Klebschicht und rechnet mit einem reinen Klebstoffversagen. Bei den Proben der experimentellen Untersuchung gelang es nicht bei allen Probekörpern eine gute Fertigungsqualität zu erreichen. Welcher Faktor einen stärkeren Einfluss auf die Ergebnisse hat ist nicht feststellbar.

Generell zeigen alle Untersuchungen eine Festigkeitssteigerung der Probekörper mit einer variablen Schäftung gegenüber den vergleichbaren konstanten Geometrien. Die Steigerung fällt für bei Untersuchungen jedoch unterschiedlich aus.

Bei den konstanten Schäftungen QI1-K-1 und QI1-K-2 liegt die Versagensspannung der Simulationsergebnisse unter denen der Versuche. In den Zugversuchen versagten die Proben bei einer um 12,67 % (QI1-K-1) bzw. 6,24 % (QI1-K-2) höheren Versagensspannung. Dies spricht einerseits für eine gute Qualität dieser Proben in der Fertigung (wie bereits in Abschnitt 6.4 gezeigt), andererseits zeigt das von-MISES-Versagenskriterium für die Klebschichtdehnung eine gute Annäherung. Die Versagensspannung der konstanten Probe QI3-K-2 sinkt um 21,23 % im Vergleich zur FE-Simulation. Diese Probe weist allerdings im Gegensatz zu denen mit Lagenaufbau QI1 eine schlechtere Fertigungsqualität auf.

Die variablen Probekörper mit Lagenaufbau QI1 erreichen im Zugversuch eine deutliche niedrigere Versagensspannung als die vergleichbaren Simulationen. Der Wert von QI1-V-1 sinkt im Zugversuch um 32,33 %, QI1-V-2 um 21,47 %, QI1-V-3 um 12,52 % und QI1-V-4 um 42,83 %. Nur die Probe QI1-V-5 versagt im Zugversuch bei einer um 8,89 % gesteigerten Versagensspannung. In der Tendenz spiegeln diese Abweichungen die Ergebnisse der Auswertung der Probenqualität wider. QI1-V-5 weist die niedrigste Standardabweichung, den niedrigsten Variationskoeffizient und die niedrigste Abweichung von der idealen Klebschichtdicke auf.

Beim Vergleich der analysierten ETD-Prüfungen ergibt sich eine große Abweichung der Werte bei den konstanten Schäftungen. Im Zugversuch wurde eine um ca. 50 % höhere Versagensspannung ermittelt. Es ist daher nicht möglich, die in der numerischen Untersuchung ermittelten Festigkeitszunahme der variablen gegenüber der konstanten Schäftung experimentell nachzuweisen. Die Ursache dafür liegt möglicherweise in der unzureichenden Aufbringung des Temperaturfeldes oder der Annahme inkorrektter Werkstoffkennwerte in der numerischen Simulation.

Bei den Versuchen mit Lagenaufbau QI3 zeigen sich ebenfalls große Abweichungen beim Vergleich beider Untersuchungen. Die Versagensspannung sinkt bei QI3-V-1 um 53,65 %, bei QI3-V-2 um 19,89 % und bei QI3-V-3 um 0,92 %. Auch dies spiegelt die Unterschiede bei der Fertigungsqualität wider. Es wurde gezeigt, dass die Geometrie QI3-V-3 die niedrigste Standardabweichung und den niedrigsten Variationskoeffizienten aufweist.

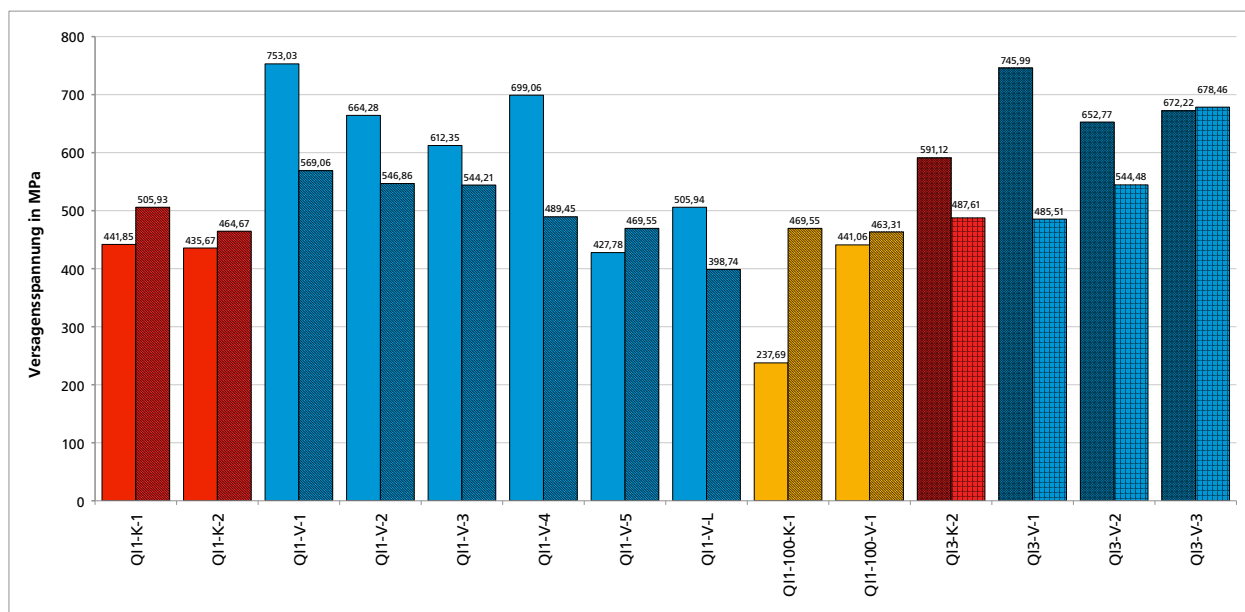


Abbildung 7.1: Vergleich der Versagensspannungen der FE-Simulation und der Zugversuche. Der jeweils linke Balken zeigt die Simulationsergebnisse, der rechte die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung.

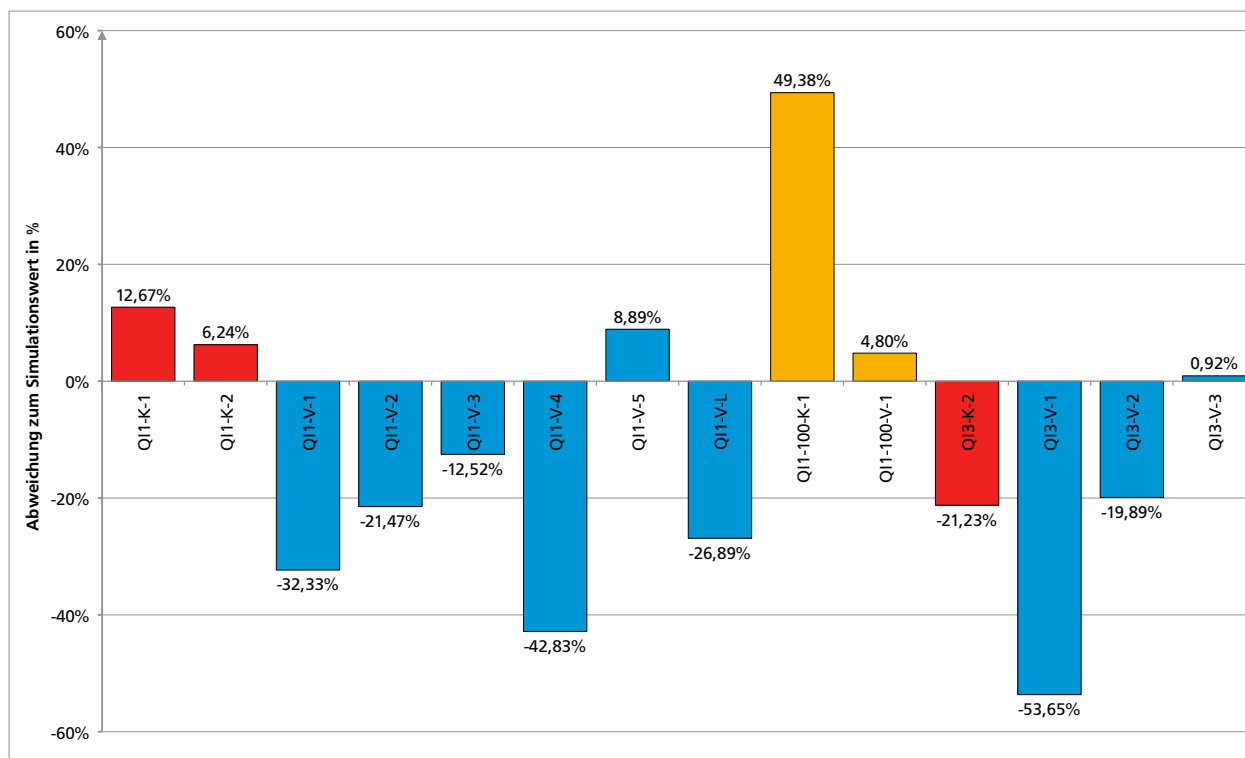


Abbildung 7.2: Prozentuale Abweichung der Versagensspannungen des experimentellen Zugversuchs von den Simulationsergebnissen

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird der Einfluss lagenvariabler Schäftungswinkel auf die Verbindungsfestigkeit geklebter Faserverbundreparaturen untersucht.

Dabei wurden zunächst die Grundlagen der CFK-Reparaturverfahren und die Vorteile von geklebten Schäftungsverbindungen vorgestellt. Im Gegensatz zu isotropen Werkstoffen stellt sich bei der Verklebung zweier Laminatfügekörper in der Klebschicht keine konstante Schubspannung bei Zugbelastung ein. Mithilfe einer einfachen analytischen Herleitung konnte das Potential lagenvariabler Schäftungswinkel aufgezeigt werden. Anhand der unterschiedlichen Lagensteifigkeiten, die aus der Faserorientierung resultieren, kann eine ideale Klebschichtgeometrie ermittelt werden.

Ausgehend von dieser idealen Geometrie wurden mithilfe einer FE-Simulation verschiedene variable Schäftungsgeometrien untersucht. Zunächst stand dabei die Analyse des Einflusses einzelner Parameter auf den Schubspannungsverlauf in der Klebschicht und der Zugfestigkeit einer Probengeometrie im Vordergrund. Es wurden die Auswirkungen verschiedener Winkeländerungen, Laminataufbauten, Klebschichtgeometrien und erhöhter Umgebungstemperaturen untersucht. Auch die Möglichkeit einer nach dem Spannungsverlauf individuell angepassten Schäftungsgeometrie wurde geprüft. Ein weiteres Potential besteht in der Verkürzung der Reparaturlänge unter Beibehaltung der Zugfestigkeit einer vergleichbaren konstanten Schäftung. Die Auslegung einer solchen Klebschichtgeometrie wurde ebenfalls mithilfe der FE-Simulation analysiert.

Die Auswertung der FEM zeigt, dass eine Glättung der in der Klebschicht auftretenden Schubspannung möglich ist. Dies führt zu einer Steigerung der Versagensspannungen, da die versagenskritische Grenzschubspannung bei höherer Probendehnung erreicht wird. Es wurden Festigkeitssteigerungen der Proben mit einer variablen Schäftung von über 40 % im Vergleich zu entsprechenden konstanten Schäftungsgeometrien ermittelt. Alternativ kann eine Verkürzung der Reparaturlänge um 38 % erreicht werden.

Ausgehend von den numerischen Ergebnissen wurde ein Couponprobenprogramm erstellt. Die Ergebnisse der FE-Analyse wurden mittels Zugversuch überprüft. Dabei zeigte sich insbesondere eine quantitativ beschreibbare Korrelation zwischen Fertigungsqualität und Versagensbeginn. Eine über der Reparaturlänge konstante Klebschichtdicke bildet die essentielle Grundlage für eine Festigkeitssteigerung. Die Probekörper mit einer ebenso geringen Standardabweichung und niedrigem Variationskoeffizienten zeigten die höchste Festigkeitssteigerung. Auch die Verkürzung der Reparaturlänge bei Erhaltung der Festigkeit konnte im Zugversuch nachgewiesen werden.

Die geringere Auswirkung einer erhöhten Prüftemperatur auf die Zugfestigkeit einer mit variablen Schäftungswinkeln ausgelegten Couponprobe konnte nur mittels FE-Simulation belegt werden. Die Verifizierung im experimentellen Zugversuch war nicht möglich.

Aufgrund verschiedener Einflüsse ist ein Vergleich der numerischen und experimentellen Untersuchung nur bedingt möglich. Quantitativ sind die Ergebnisse nicht miteinander vergleichbar. Sie eignen sich jedoch für eine qualitative Analyse. Generell zeigten beide Untersuchungen, dass die Auslegung einer variablen Schäftung mit lagenabhängigen Schäftungswinkeln ein großes Potential birgt.

8.2 Ausblick

Die in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen zeigen das Potential von variablen Schäftungsgeometrien bei der CFK-Strukturreparatur. Die ermittelten Werte können als Grundlage weiterer Forschungsarbeit dienen. Bis zu einer Anwendung in realen Reparaturverfahren ist eine tiefergehende Analyse der zahlreichen Einflüsse auf die Festigkeit der variablen Schäftungen erforderlich.

Zunächst sollte für eine verbesserte Versagensvorhersage das numerische Modell angepasst werden. Dazu sind detaillierte Kenntnisse über die relevanten Werkstoffparameter notwendig, da die Datengrundlage bisher unzureichend ist. Auch die Ermittlung von konkreten Werkstoffwerten bei ETW- und ETD-Umgebungsbedingungen ist erforderlich. Außerdem muss die Auswertung eines verlässlichen Laminatversagens eingefügt werden. Dazu wäre eine Verbesserung des 1 %-Puck-Kriteriums oder einer anderen Versagensvorhersage denkbar. Diese Ansätze sind aktueller Bestand der Forschungsarbeit am DLR.

In Abschnitt 5.2.3 wurden die Schäftungswinkel manuell an den in der Klebschicht vorherrschenden Spannungszustand angepasst. Für eine verbesserte Optimierung sollte die ideale Schäftungsgeometrie über mehrere Berechnungsschritte aufgrund der jeweils vorherrschenden Spannungsverläufe numerisch optimiert werden. Dadurch wäre die Auslegung auch für weitere Lagenaufbauten und Belastungen mit wenig Aufwand möglich.

Des Weiteren sollte die numerische und experimentelle Auslegung von dreidimensionalen Schäftungen mit variablen Schäftungswinkeln analysiert werden, da bisher nur zweidimensional ausgelegt wurde. Dabei sind neben der reinen Zugbelastung auch weitere Lastfälle, wie z.B. Druck, Schub, Biegung oder Schwingungen zu beachten.

Im experimentellen Zugversuch konnte gezeigt werden, dass die korrekte Einstellung der Klebschichtdicke essentiell für die Qualität der Zugproben und der damit verbundenen Versagensspannung ist. Da die in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Versuche die ersten ihrer Art waren, zeigten sich Probleme bei der Erlangung der geforderten Probekörperqualität. In Abschnitt 6.6.4 wurden bereits Maßnahmen für eine verbesserte Probenqualität aufgezeigt. Für eine detaillierte Kenntnis der Einflüsse auf die Probenqualität ist die Durchführung eines großen Couponprobenprogramms zu empfehlen. Dabei sollten Parameter wie Klebschichtdicke, Vakuumaufbau, Temperatur- und Feuchtigkeitseinflüsse sowie Klebstoffart und Fixierungsmöglichkeiten untersucht werden. Ein Problem bei der Fertigung war die dünner werdende Klebschichtdicke an der Seite des Vakuumaufbaus. Dieser Problematik könnte mit einer anderen Fertigungsmethode entgegengetreten werden. Beispielsweise ist die Verwendung von zusätzlichen Abdeckplatten, eines modifizierten Vakuumaufbaus oder eines angepassten Werkzeugs denkbar. Diese Modifizierung würde auch die Menge des herausgedrückten Klebstoffs in den Spalt zwischen Werkzeug und Probekörper reduzieren.

Die experimentellen Untersuchungen unter ETD-Bedingungen haben nicht die erhoffte Wirkung gezeigt. Gründe hierfür waren die Probenqualität und möglicherweise die Art der Erwärmung. Es sollte angestrebt werden, die Proben durch ein berührungsloses Heizsystem zu erhitzen. Damit wäre die Möglichkeit einer gleichmäßigen Erwärmung der gesamten Oberfläche gegeben.

In Kapitel 5 wurde gezeigt, dass die Knickpunkte innerhalb der Lagen Spannungsspitzen erzeugen, die teilweise versagensinitiiierend sind. Die genauere Analyse der Positionen bezogen auf den Lagenaufbau ergab, dass ausschließlich die Innenknicke Schubspannungsspitzen in den $\pm 45^\circ$ -Lagen hervorrufen. Daher ist die numerische Analyse einer Geometrie mit der Positionierung der Innenknicke auf der Grenzfläche zwischen den 0° - und $\pm 45^\circ$ -Lage durchzuführen. Inwiefern die gleichzeitige Verschiebung der Außenknicke eine Auswirkung auf den Spannungsverlauf hat ist zu überprüfen. Auch ein fließender Übergang, d.h. ohne einen Knick zwischen den lagenabhängigen Schäftungswinkeln sollte analysiert werden. Beide Maßnahmen hätten möglicherweise eine Senkung

der Spannungsspitzen zur Folge, was sich direkt auf die Steigerung der Zugfestigkeit auswirken würde. Auch die Untersuchung einer Geometrie bei der die Verschiebung in Normalenrichtung nur auf einer Seite der Klebschicht erfolgt, sollte durchgeführt werden.

Die Auswertung der Zugversuche hat gezeigt, dass eine Verschiebung der Lagen beider Fügepartner zueinander geringe Auswirkungen auf die Zugfestigkeit der Proben hat. Daher ist die Auslegung einer Geometrie mit einer solchen Lagenverschiebung nochmals genauer zu prüfen. Durch die in der Entwicklung befindlichen Fräsen ist das Aufbringen einer variablen Schäftung in alle Werkstoffe möglich. Da der herzustellende Flicker dieselbe Schäftungsgeometrie wie die Grundstruktur aufweisen muss, ist die Machbarkeit bei Reparaturverfahren mit z.B. von Hand getränkten Laminaten zu verifizieren.

Durch ein verbessertes numerisches Modell und der Implementierung der genannten Maßnahmen in der Probenfertigung ist eine weitere Vertiefung der Erkenntnisse zum Potential lagenvariabler Schäftungen möglich.



Literaturverzeichnis

- [ABC05] ARMSTRONG, K. B. ; BEVAN, L. G. ; COLE W.F.: *Care and Repair of Advanced Composites*. SAE International (Warrendale, Pa.), 2005
- [AEC95] AECMA ; EUROPEAN ASSOCIATION OF AEROSPACE INDUSTRIES (Hrsg.): *Determination of tensile strength of a tapered and stepped joint (prEN 6066)*. European Association of Aerospace Industries, 1995
- [BDK04] BAKER, Alan ; DUTTON, Stuart ; KELLY, Donald: *Composite Materials for Aircraft Structures*. Second Edition. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004
- [BIC⁺09] BREITZMAN, T. D. ; IARVE, E. V. ; COOK, B. M. ; SCHOEPPNER, G. A. ; LIPTON, R. P.: Optimization of a composite scarf repair patch under tensile loading. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 40 (2009), Nr. 12, S. 1921–1930. – ISSN 1359835X
- [CMD07] CAMANHO, PP. ; MAIMÍ, P. ; DÁVILA, C.G.: Prediction of size effects in notched laminates using continuum damage mechanics. In: *Composites Science and Technology* 67 (2007), S. 2715–2727
- [DB99] DAVIS, Maxwell ; BOND, David: Principles and practices of adhesive bonded structural joints and repairs. In: *International Journal of Adhesion & Adhesives* 19 (1999), S. 91–105
- [ER71] ERDOGAN, F. ; RATWANI, M.: Stress Distribution in Bonded Joints. In: *Journal of Composite Materials* 5 (1971), S. 378
- [FAA02] FAA: Shear Stress-Strain Data for Structural Adhesives / U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration. 2002. – Forschungsbericht
- [GOM13] GOM GESELLSCHAFT FÜR OPTISCHE MESSTECHNIK (Hrsg.): *ARAMIS Benutzerhandbuch - Software*. GOM Gesellschaft für optische Messtechnik, 2013
- [Hab08] HABENICHT, Gerd: *Kleben - erfolgreich und fehlerfrei*. Vieweg+Teubner, 2008
- [Hab09] HABENICHT, Gerd: *Kleben*. 6. Auflage. Springer (Berlin, Heidelberg), 2009
- [Har06] HARMAN, Alex: *Optimisation and Improvement of the Design of Scarf Repairs to Aircraft*, School of Mechanical and Manufacturing Engineering, The University of New South Wales, Diss., 2006
- [HP12] HOLZHÜTER, Dirk ; POTOTZKY, Alexander: Automated Scarf Unit for Bonded Composite Repair / DLR. 2012. – Forschungsbericht
- [HS73] HART-SMITH: Adhesive-bonded scarf and stepped lap-joints / NASA. 1973. – Forschungsbericht
- [KJK⁺06] KWEON, Jin-Hwe ; JUNG, Jae-Wong ; KIM, Tae-Hwan ; CHOI, Jin-Ho ; KIM, Dong-Hyun: Failure of carbon compo-to-aluminium joints with combined mechanical fastening and adhesive bonding. In: *Composite Structures* 75 (2006), S. 192–198
- [KSS⁺06] KUMAR, S.B. ; SRIDHAR, I. ; SIVASHANKER, S. ; OSIYEMI, S.O. ; BAG, A.: Tensile failure of adhesively bonded CFRP composite scarf joints. In: *Materials Science & Engineering B* 132 (2006), S. 113–120

-
- [LTH04] LTH FASERVERBUND-LEICHTBAU (Hrsg.): *Schäften als Reparaturverfahren*. FL 74 200-04, Ausgabe A. LTH Faserverbund-Leichtbau, 2004
- [Mar11] MARLETT, Krisitin: Hexcel 8552 IM7 Unidirectional Prepreg 190 gsm & 35Material Property Report / National Institute for Aviation Research, Wichita University. 2011. – Forschungsbericht
- [MSC13] MSC.SOFTWARE COOPERATION (Hrsg.): *MSC Nastran 2013.1 Quick Reference Guide*. MSC.Software Cooperation, 2013
- [Niu92] NIU, Michael C.: *Composite Airframe Structures*. Hong Kong Conmilit Press Ltd., 1992
- [NMS13] NIKISHKOV, Yuri ; MAKEEV, Andrew ; SEON, Guillaume: Progressive fatigue damage simulation method for compistes. In: *International Journal of Fatigue* 48 (2013), S. 266–279
- [Pot12] POTOTZKY, Alexander: *Validierung des automatisierten Schäftens von Luftfahrt-Faserverbundbauteilen mittels einer mobilen CNC-Fräsanlage*, TU Braunschweig, Diplomarbeit, 2012
- [Sau07] SAUER, Christian: Lufthansa Perspective on Applications & Field Experiences for Composite Airframe Structures / Lufthansa Technik. 2007. – Forschungsbericht
- [Sch07] SCHÜRMANN, Helmut: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. 2. Auflage. Springer (Berlin, Heidelberg, New York), 2007
- [WG07] WANG, Chun ; GUNNION, Andrew: On the design methodology of scarf repairs to composite laminates. In: *Composites Science and Technology* 68 (2007), Nr. 68, S. 35–46
- [WG09] WANG, Chun ; GUNNION, Andrew: Optimum shapes of scarf repairs. In: *Composites: Part A* 40 (2009), S. 1407 – 1418
- [WW13] WESTPHAL ; WIERACH ; INSTITUT FÜR FASERVERBUNDLEICHTBAU UND ADAPTRONIK (Hrsg.): *Nomenklatur von Probekörpern-Verfahrensanweisung*. Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, 2013
- [Wö12] WÖLPER, Johannes: Manual bonded-scarf-joint specimen tool / DLR. 2012. – Forschungsbericht
- [Wö14] WÖLPER, Johannes: Validierung der Sizing-Methodik für geschäftete Klebverbindungen / DLR. 2014. – Forschungsbericht

Anhang A: Herleitung der reduzierten Lagensteifigkeiten

Die Werkstoffkennwerten für das Prepreg *Hexcel 8552 IM-7* lauten:

$$\begin{aligned}E_x &= 175084 \text{ MPa} \\E_y &= 9356 \text{ MPa} \\G_{xy} &= 175084 \text{ MPa} \\v_{xy} &= v_{yx} \cdot \frac{E_y}{E_x} = 0,32\end{aligned}$$

Daraus können die reduzierten Steifigkeiten Q_{ij} bestimmt werden:

$$\begin{aligned}Q_{11} &= \frac{E_x}{1 - v_{xy}} = 176047,33 \text{ MPa} \\Q_{22} &= \frac{E_y}{1 - v_{xy}} = 9407,48 \text{ MPa} \\Q_{12} &= Q_{21} = \frac{E_x \cdot v_{yx}}{1 - v_{xy}} = 3010,39 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Die reduzierte Steifigkeit für die 0° -Richtung kann direkt aus der Formel für Q_{11} abgelesen werden. Die der 90° -Richtung aus der Formel für Q_{22} . Für die $\pm 45^\circ$ -Lagen muss eine Transformation mit folgender Transformationsvorschrift durchgeführt werden:

$$Q_{45} = (T_{45})^T \cdot Q_0 \cdot T_{45} \quad (8.1)$$

Dabei ist

$$Q_0 = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & G_{xy} \end{pmatrix}$$

und

$$T_{45} = \begin{pmatrix} \cos^2(45) & \sin^2(45) & -\sin(45)\cos(45) \\ \sin^2(45) & \cos^2(45) & \sin(45)\cos(45) \\ 2 \cdot \sin(45)\cos(45) & -2 \cdot \sin(45)\cos(45) & \cos^2(45) - \sin^2(45) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,5 & 0,5 & -1 \\ 0,5 & 0,5 & 1 \\ 0,5 & -0,5 & 0 \end{pmatrix}$$

Es ergibt sich:

$$Q_{45} = \begin{pmatrix} 53318,9 & 42418,9 & 41660 \\ 42418,9 & 53318,9 & 41660 \\ 41660 & 41660 & 44858,5 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

Die reduzierte Lagensteifigkeit der $\pm 45^\circ$ -Lagen kann direkt aus der ersten Stelle der Matrix abgelesen werden. Es werden folgende, gerundete Steifigkeiten für die 0° -, 90° - und $\pm 45^\circ$ -Lagen angenommen:

$$\begin{aligned} Q_0 &= 176000 \text{ MPa} \\ Q_{90} &= 9400 \text{ MPa} \\ Q_{\pm 45} &= 53300 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Anhang B: Protokolle

Vermessungsprotokoll für den Zugversuch



Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptionik
Vermessungsprotokoll für ungekerbte Zug-, Druck- oder CAI-Prüfkörper

MH-FA-47-FB03
Version 1.0
10.10.2007

Art der Prüfung: <input checked="" type="checkbox"/> Zugprüfung (TEN) <input type="checkbox"/> Druckprüfung (COM) <input type="checkbox"/> Impactprüfung (CAI)	
Probenlaufplannummer: 2013-016	Material: IM7/8552
Auftraggeber: Kosmann	Konditionierung: keine

Kennzeichnung	CAIRE-IM7-1-TEN-D-RT-V-1		Freie Länge [mm]:	160	Prüftemperatur [°C]	23
Lfd. Nr.	.d* [mm]	.b** [mm]	Bemerkungen			
01	3,07	25,49	d Schäftung: 3,17 mm			
02	3,09	25,42-25,52	d Schäftung: 3,22 mm			
03	3,08	25,43-25,55	d Schäftung: 3,34 mm			

* entspricht dem „t“ bei AITM-Normen; ** entspricht dem „w“ bei AITM-Normen

Kennzeichnung	CAIRE-IM7-1-TEN-D-RT-V-L		Freie Länge [mm]:	160	Prüftemperatur [°C]	23
Lfd. Nr.	.d* [mm]	.b** [mm]	Bemerkungen			
01	3,08	25,45	d Schäftung: 3,0 mm			
02	3,09	25,39-25,44	d Schäftung: 2,95 mm			
03	3,08	25,43	d Schäftung: 2,83 mm			
04	3,08	25,49	d Schäftung: 2,85 mm			
05	3,09	25,54-25,44	d Schäftung: 2,88 mm			
06	3,07	25,48-25,58	d Schäftung: 2,93 mm			

* entspricht dem „t“ bei AITM-Normen; ** entspricht dem „w“ bei AITM-Normen

Kennzeichnung	CAIRE-IM7-1-TEN-D-RT-K-2		Freie Länge [mm]:	160	Prüftemperatur [°C]	23
Lfd. Nr.	.d* [mm]	.b** [mm]	Bemerkungen			
01	3,08	25,45	d Schäftung: 3,1 mm			
02	3,09	25,48-25,49	d Schäftung: 3,09 mm			
03	3,08	25,53-25,48	d Schäftung: 3,08 mm			

* entspricht dem „t“ bei AITM-Normen; ** entspricht dem „w“ bei AITM-Normen

Kennzeichnung	CAIRE-IM7-1-TEN-D-RT-K-1		Freie Länge [mm]:	160	Prüftemperatur [°C]	23
Lfd. Nr.	.d* [mm]	.b** [mm]	Bemerkungen			
01	3,07	25,45	d Schäftung: 3,08 mm			
02	3,07	25,46	d Schäftung: 3,09 mm			
03	3,08	25,5				

* entspricht dem „t“ bei AITM-Normen; ** entspricht dem „w“ bei AITM-Normen

Kennzeichnung	CAIRE-IM7-1-TEN-D-RT-V-2		Freie Länge [mm]:	160	Prüftemperatur [°C]	23
Lfd. Nr.	.d* [mm]	.b** [mm]	Bemerkungen			
01	3,08	25,3-25,45	d Schäftung: 3,5 mm			
02	3,08	25,4-25,2	d Schäftung: 3,46			
03	3,07	25,4	d Schäftung: 3,44 mm			

* entspricht dem „t“ bei AITM-Normen; ** entspricht dem „w“ bei AITM-Normen



Kennzeichnung	CAIRE-IM7-1-TEN-D-RT-V-3		Freie Länge [mm]:	160	Prüftemperatur [°C]	23
Lfd. Nr.	.d* [mm]	.b** [mm]	Bemerkungen			
01	3,07	25,7-25,6	d Schäftung: 3,1 mm			
02	3,08	25,7-25,53	d Schäftung: 3,13 mm			
03	3,08	25,47-25,35	d Schäftung: 3,18 mm			

* entspricht dem „t“ bei AITM-Normen; ** entspricht dem „w“ bei AITM-Normen

Kennzeichnung	CAIRE-IM7-1-TEN-D-RT-V-4		Freie Länge [mm]:	160	Prüftemperatur [°C]	23
Lfd. Nr.	.d* [mm]	.b** [mm]	Bemerkungen			
01	3,075	25,56	d Schäftung: 3,3 mm (3,22 mm-3,3 mm)			
02	3,08	25,44	d Schäftung: 3,18 – 3,24 mm			
03	3,08-3,06	25,47-25,49	d Schäftung: 3,23 mm			

* entspricht dem „t“ bei AITM-Normen; ** entspricht dem „w“ bei AITM-Normen

Kennzeichnung	CAIRE-IM7-1-TEN-D-RT-V-5		Freie Länge [mm]:	160	Prüftemperatur [°C]	100
Lfd. Nr.	.d* [mm]	.b** [mm]	Bemerkungen			
01	3,08	25,5	d Schäftung: 3,23 mm			
02	3,08	25,46	d Schäftung: 3,19 mm			
03	3,08	25,47	d Schäftung: 3,21 mm			

Kennzeichnung	CAIRE-IM7-1-TEN-D-100-V-1		Freie Länge [mm]:	170	Prüftemperatur [°C]	100
Lfd. Nr.	.d* [mm]	.b** [mm]	Bemerkungen			
01	3,08	25,43-25,47	d Schäftung: 3,21 mm // ca. 102-109°C			
02	3,1	25,46	d Schäftung: 3,14 mm			
03	3,07	25,45	d Schäftung: 3,12 mm// ca. 93 -100°C			

* entspricht dem „t“ bei AITM-Normen; ** entspricht dem „w“ bei AITM-Normen

Kennzeichnung	CAIRE-IM7-1-TEN-D-100-K-1		Freie Länge [mm]:	170	Prüftemperatur [°C]	100
Lfd. Nr.	.d* [mm]	.b** [mm]	Bemerkungen			
01	3,08	25,52-25,57	d Schäftung: 3,21 mm			
02	3,1	25,48-25,51	d Schäftung: 3,14 mm// 98 °C			
03	3,08	25,48	d Schäftung: 3,1 mm// ca. 100°C-105°C			

* entspricht dem „t“ bei AITM-Normen; ** entspricht dem „w“ bei AITM-Normen

Kennzeichnung	CAIRE-IM7-3-TEN-D-RT-V-1		Freie Länge [mm]:	160	Prüftemperatur [°C]	23
Lfd. Nr.	.d* [mm]	.b** [mm]	Bemerkungen			
01	3,08	25,5	d Schäftung: 3,06 mm (2,93 mm – 3,23 mm)			
02	3,09	25,48	d Schäftung: 2,9-3,0 mm			
03	3,08	25,5	d Schäftung: 2,95 mm (2,89 mm – 3,06 mm)			

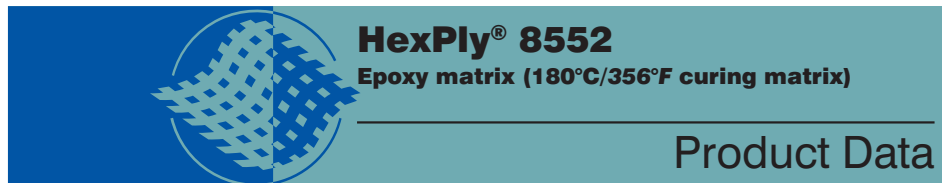


* entspricht dem „t“ bei AITM-Normen; ** entspricht dem „w“ bei AITM-Normen			
Kennzeichnung	CAIRE-IM7-3-TEN-D-RT-K-2		Freie Länge [mm]: 160 Prüftemperatur [°C] 23
Lfd. Nr.	.d* [mm]	.b** [mm]	Bemerkungen
01	3,08	25,5	d Schäftung: 3,21 mm
02	3,09	25,48	d Schäftung: 3,18 mm
03	3,08	25,49	d Schäftung: 3,15 mm – 3,21 mm
* entspricht dem „t“ bei AITM-Normen; ** entspricht dem „w“ bei AITM-Normen			
Kennzeichnung	CAIRE-IM7-3-TEN-D-RT-V-2		Freie Länge [mm]: 160 Prüftemperatur [°C] 23
Lfd. Nr.	.d* [mm]	.b** [mm]	Bemerkungen
01	3,08	25,45	d Schäftung: 3,05 mm
02	3,09	25,46	d Schäftung: 3,08 mm
03	3,09	25,46	d Schäftung: 3,09 mm – 3,075 mm
* entspricht dem „t“ bei AITM-Normen; ** entspricht dem „w“ bei AITM-Normen			
Kennzeichnung	CAIRE-IM7-3-TEN-D-RT-V-3		Freie Länge [mm]: 160 Prüftemperatur [°C] 23
Lfd. Nr.	.d* [mm]	.b** [mm]	Bemerkungen
01	3,08	25,2	b: 25,0 mm – 25,33 mm // d Schäftung: 3,3 mm
02	3,09	25,49	d Schäftung: 3,3 mm
03	3,09	25,5	d Schäftung: 3,3 mm – 3,23 mm
* entspricht dem „t“ bei AITM-Normen; ** entspricht dem „w“ bei AITM-Normen			



Anhang C: Datenblätter

Laminat *Hexcel 8552 IM-7*



Description

HexPly® 8552 is a high performance tough epoxy matrix for use in primary aerospace structures. It exhibits good impact resistance and damage tolerance for a wide range of applications.

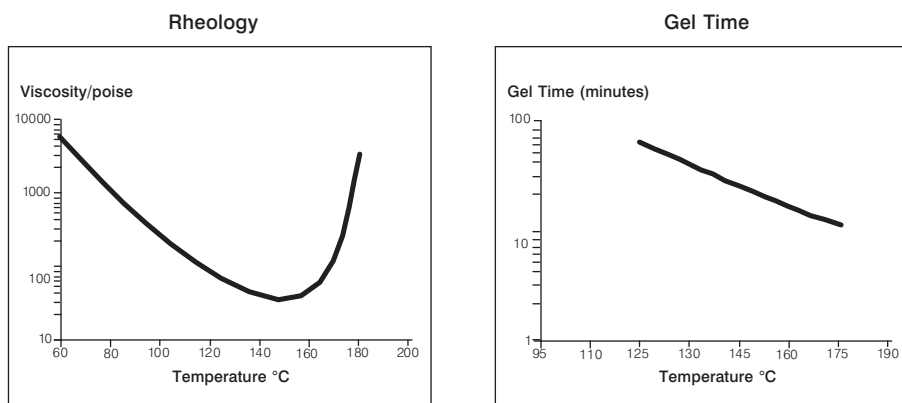
HexPly® 8552 is an amine cured, toughened epoxy resin system supplied with unidirectional or woven carbon or glass fibres.

HexPly® 8552 was developed as a controlled flow system to operate in environments up to 121°C (250°F).

Benefits and Features

- Toughened epoxy matrix with excellent mechanical properties
- Elevated temperature performance
- Good translation of fibre properties
- Controlled matrix flow in processing
- Available on various reinforcements
- Excellent drape and tack

Resin Matrix Properties





HexPly® 8552

Prepreg Properties - HexPly® 8552 UD Carbon Prepregs

Physical Properties

	Units	AS4	IM7
Fibre Density	g/cm ³ (lb/in ³)	1.79 (0.065)	1.77 (0.064)
Filament count/tow		12K	12K
Resin density	g/cm ³ (lb/in ³)	1.30 (0.047)	1.30 (0.047)
Nominal Cured Ply Thickness 8552 /35%/134	mm (inch)	0.130 (0.0051)	0.131 (0.0052)
Nominal Fibre Volume	%	57.42	57.70
Nominal Laminate Density	g/cm ³ (lb/in ³)	1.58 (0.057)	1.57 (0.057)

Mechanical Properties

Test	Units	Temp °C (°F)	Condition	AS4	IM7
0°Tensile Strength	MPa (ksi)	-55(-67) 25(77) 91(195)	Dry Dry Dry	1903 (267) 2207 (320) -	2572 (373) 2724 (395) 2538 (368)*
90°Tensile Strength	MPa (ksi)	-55(-67) 25(77) 93(200)	Dry Dry Dry	- 81 (11.7) 75 (10.9)	174 (25.3) 64 (9.3) 92 (13.3)*
0°Tensile Modulus	GPa (msi)	-55(-67) 25(77) 91(195)	Dry Dry Dry	134 (19.4) 141 (20.5) -	163 (23.7) 164 (23.8) 163 (23.7)*
90°Tensile Modulus	GPa (msi)	- 25(77) 93(200)	- Dry Dry	- 10 (1.39) 8 (1.22)	- 12 (1.7) 10 (1.5)*
0°Compression Strength	MPa (ksi)	-55(-67) 25(77) 91(195)	Dry Dry Dry	1586 (230) 1531 (222) 1296 (184)	- 1690 (245) 1483 (215)
0°Compression Modulus	GPa (msi)	-55(-67) 25(77) 91(195)	Dry Dry Dry	124 (18) 128 (18.6) 122 (17.7)	- 150 (21.7) 162 (23.5)
0° ILSS (Shortbeam shear)	MPa (ksi)	-55(-67) 25(77) 91(195) 25(77) 71(160) 91(195)	Dry Dry Dry Wet Wet Wet	164 (23.8) 128 (18.5) 122 (14.7) 117 (16.9) 84 (12.2) 78 (11.3)	- 137 (19.9) 94 (13.6)* 115 (16.7) 80 (11.6)** -
In-plane Shear Strength	MPa (ksi)	25(77) 93(200)	Dry Dry	114 (16.6) 105 (15.2)	120 (17.4) 106 (15.4)*

Bold 93°C (200°F)

Bold* 104°C (220°F)

Bold** 82°C (180°F)



Epoxy matrix (180°C/356°F curing matrix)

Prepreg Properties - HexPly® 8552 Woven Carbon Prepregs (AS4 Fibre)

Physical Properties

	Units	AGP193-PW	AGP 280-5H
Fibre Type	-	AS4 3K	AS4 3K
Fibre density	g/cm ³ (lb/in ³)	1.77 (0.065)	1.77 (0.065)
Weave	-	Plain	5HS
Mass	g/m ² (oz/yd ²)	193 (5.69)	286 (8.44)
Weight Ratio, Warp : Fill		50 :50	50 :50
Nominal cured ply thickness @ 37% resin content	mm (inch)	0.195 (0.0076)	0.289 (0.0114)
Nominal Fibre Volume	%	55.29	55.29
Nominal Laminate Density	g/cm ³ (lb/in ³)	1.57 (0.057)	1.57 (0.057)

Mechanical Properties

Test	Units	Temp°C (°F)	Condition	AGP193-PW	AGP280- 5H
0°Tensile Strength	MPa (ksi)	-55(-67) 25(77) 91(195)	Dry Dry Dry	766 (111) 828 (120) -	828 (120) 876 (127) 903 (131)
90°Tensile Strength	MPa (ksi)	-55(-67) 25(77) 93(200)	Dry Dry Dry	710 (103) 793 (115) 759 (110)	752 (109) 800 (116) 772 (112)
0°Tensile Modulus	GPa (msi)	-55(-67) 25(77) 91(195)	Dry Dry Dry	66 (9.5) 68 (9.8) -	70 (10.2) 67 (9.7) 69 (10)
90°Tensile Modulus	GPa (msi)	-55(-67) 25(77) 93(200)	Dry Dry Dry	66 (9.6) 66 (9.5) 68 (9.8)	67 (9.7) 66 (9.5) 65 (9.4)
0°Compression Strength	MPa (ksi)	-55(-67) 25(77) 91(195)	Dry Dry Dry	959 (139) 883 (128) 759 (110)	- 924 (134) 752 (109)
0°Compression Modulus	GPa (msi)	-55(-67) 25(77) 91(195)	Dry Dry Dry	60 (8.7) 60 (8.7) 61 (8.8)	- 64 (9.3) 67(9.7)
0° ILSS (Shortbeam shear)	MPa (ksi)	-55(-67) 25(77) 91(195) 25(77) 71(160) 91(195)	Dry Dry Dry Wet Wet Wet	101 (14.6) 84 (12.2) 70 (10.2) 75 (10.9) 72 (10.4) 59 (8.5)	- 79 (11.4) - 69 (10) - -

Bold 93°C (200°F)

Bold* 104°C (220°F)

Bold 82°C (180°F)**

HexPly® 8552

Prepreg Properties - HexPly® 8552 Woven Carbon Prepregs (IM7 Fibre)

Physical Properties

	Units	SPG 196-P	SPG 370-8H
Fibre Type	-	IM7 6K	IM7 6K
Fibre density	g/cm ³ (lb/in ³)	1.77 (0.064)	1.77 (0.064)
Weave	-	Plain	8HS
Mass	g/m ² (oz/yd ²)	196 (5.78)	374 (11.03)
Weight Ratio, Warp : Fill		50 : 50	49 : 51
Nominal cured ply thickness @ 37% resin content	mm (inch)	0.199 (0.0078)	0.380 (0.0150)
Nominal Fibre Volume	%	55.57	55.57
Nominal Laminate Density	g/cm ³ (lb/in ³)	1.56 (0.056)	1.56 (0.056)

Mechanical Properties

Test	Units	Temp°C (°F)	Condition	SPG 196-PW	SPG 370-8H
0°Tensile Strength	MPa (ksi)	-55(-67) 25(77) 91(195)	Dry Dry Dry	979 (142) 1090 (158) -	965 (140) 1014 (147) -
90°Tensile Strength	MPa (ksi)	-55(-67) 25(77) 93(200)	Dry Dry Dry	862 (125) 945 (137) 979 (142)*	903 (131) 959 (139) 879 (130)*
0°Tensile Modulus	GPa (msi)	-55(-67) 25(77) 91(195)	Dry Dry Dry	85 (12.3) 85 (12.3) -	86 (12.5) 86 (12.4) -
90°Tensile Modulus	GPa (msi)	-55(-67) 25(77) 93(200)	Dry Dry Dry	80 (11.6) 80 (11.6) 79 (11.5)*	81 (11.7) 81 (11.7) 79 (11.5)*
0° ILSS (Shortbeam shear)	MPa (ksi)	-55(-67) 25(77) 91(195)	Dry Dry Dry	- 88 (12.7) 69 (10)*	- 90 (13) 74 (10.8)*
		25(77) 71(160) 91(195)	Wet Wet Wet	80 (11.6) 61 (8.8)** -	83 (12.1) 63 (9.1)** -

Bold 93°C (200°F)

Bold* 104°C (220°F)

Bold** 82°C (180°F)

Typical Neat Resin Data

Colour	Yellow	
Density	1.301 g/cc	(0.0470 lb/in ³)
Glass Transition Temperature, Tg dry	200°C	(392°F)
Glass Transition Temperature, Tg wet	154°C	(309°F)
Tensile Strength	121 MPa	(17.5 ksi)
Tensile Modulus	4670 MPa	(0.677 msi)



Epoxy matrix (180°C/356°F curing matrix)

Curing Conditions

Cure cycle for monolithic components

1. Apply full vacuum (1 bar).
2. Apply 7 bar gauge autoclave pressure.
3. Reduce the vacuum to a safety value of 0.2 bar when the autoclave pressure reaches approximately 1 bar gauge.
4. Heat at 1-3°C/min (2-8°F/min) to 110°C ± 5°C (230°F ± 9°F)
5. Hold at 110°C ± 5°C (230°F ± 9°F) for 60 minutes ± 5 minutes.
6. Heat at 1-3°C/min (2-8°F/min) to 180°C ± 5°C (356°F ± 9°F)
7. Hold at 180°C ± 5°C (356°F ± 9°F) for 120 minutes ± 5 minutes.
8. Cool at 2-5°C (4-9°F) per minute
9. Vent autoclave pressure when the component reaches 60°C (140°F) or below.

Cure cycle for honeycomb sandwich components

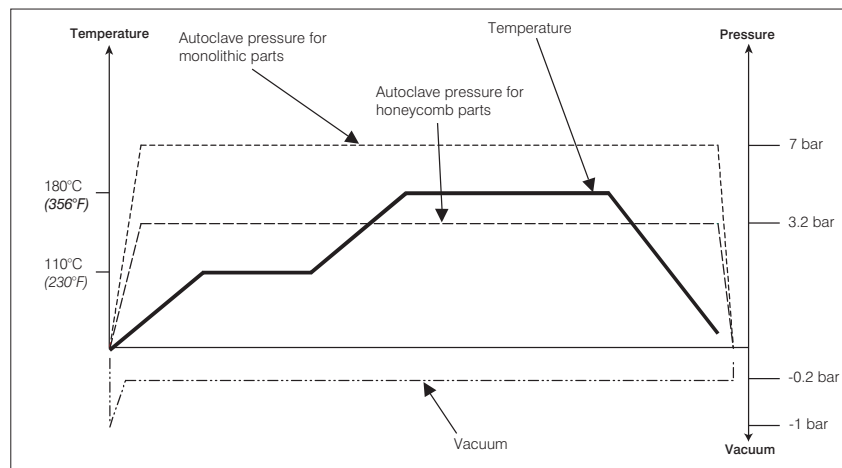
1. Apply full vacuum (1 bar).
2. Apply 3.2 bar gauge autoclave pressure.
3. Reduce the vacuum to a safety value of 0.2 bar when the autoclave pressure reaches approximately 1 bar gauge.
4. Heat at 1-3°C/min (2-8°F/min) to 110°C ± 5°C (230°F ± 9°F)
5. Hold at 110°C ± 5°C (230°F ± 9°F) for 60 minutes ± 5 minutes.
6. Heat at 1-3°C/min (2-8°F/min) to 180°C ± 5°C (356°F ± 9°F)
7. Hold at 180°C ± 5°C (356°F ± 9°F) for 120 minutes ± 5 minutes.
8. Cool at 2-5°C (4-9°F) per minute
9. Vent autoclave pressure when the component reaches 60°C (140°F) or below.

Note: For both cure cycles – at each stage, use the temperature shown by the leading thermocouple.

Heat-up rates are dependent on component thickness, eg, slow heat-up rates should be used for thicker components and large tools. Accurate temperature measurements of the component should be made during the cure cycles by using thermocouples.

Performance testing should accompany alternative cure cycles to ensure suitability for the particular application.

Curing Cycle for Honeycomb and Monolithic Components





Hysol® EA 9695

Epoxy Film Adhesive

Henkel Corporation
Aerospace Group
2850 Willow Pass Road
P.O. Box 312
Bay Point, CA 94565 USA
925.458.8000
Fax: 925.458.8030
www.aerospace.henkel.com

Description

Hysol EA 9695 is a composite bonding film adhesive with excellent environmental resistance. It is suited for bonding composite structures, both for co-cure and pre-cured laminates. Its ability to cure at lower temperatures makes it suitable for repair of composite structures. Its low flow characteristics minimize prepreg resin intermingling.

Features

X-ray Opaque
Excellent Environmental Resistance
Reticulatable
Good Pre and Post Bond Moisture Resistance
Low Flow
Allows 250°F/121°C or 350°F/177°C Cure
Co-Cure with Composites
Long Outtime Facilitates Shop Floor Usage and Repair Applications

Handling

This product is in film form and is ready to use as received. The adhesive should be removed from cold storage and allowed to warm to room temperature (77°F/25°C). All moisture should be removed from the protective packaging before opening. The adhesive film has a protective liner(s) on it which must be removed prior to parts assembly (see "Applying" below). The liner(s) will always be a contrasting color from the adhesive to allow the user easy confirmation of removal.

Application

Storage Life - This product requires refrigerated storage. Store @ 0°F/-18°C or below for maximum storage life. Warranty life @ 0°F/-18°C is greater than 6 months from date of shipment. Store only in sealed containers to prevent moisture contamination. Allow all moisture to evaporate from container before opening for use.

Applying - Bonding surfaces should be clean, dry and properly prepared. For optimum surface preparation consult the Hysol Surface Preparation Guide. The adhesive film, with one liner left on it, may be tacked to the detail part for cutting to shape and size. The liner should remain with the adhesive until just before assembly of the detail to the other faying surface. This will minimize contamination of the adhesive bond. The bonded parts should be held in contact until the adhesive has cured. Usually 25 to 50 psi / 17 to 34 kPa is sufficient to assure proper part mating.

Open Assembly Time - This adhesive may be used within the following schedule after removing from cold storage:

- @ 77°F/25°C at least 90 days
- @ 90°F/32°C at least 45 days

Curing - This product may be cured for 1 - 1 ½ hours @ 250°F/121°C or for 1 - 2 hours @ 350°F/177°C. Heat up rate to the cure temperature is not critical, but should be between 1° and 10°F (0.6° and 5.6°C) per minute. Pressure should be applied before heating the parts to be bonded and maintained until cool down of the assembly.

Cleanup - It is important to remove excess adhesive from the part and bonding tools before it hardens. Once the adhesive is cured, it is difficult to remove except by mechanical abrasion. Uncured adhesive may be removed with denatured alcohol and many common industrial solvents. Be careful to prevent any solvent from entering the uncured bondline as solvent will degrade the final bond performance. Consult with your supplier's information pertaining to the safe and proper use of solvents.

Bond Strength Performance

Tensile Lap Shear Strength

Tensile lap shear strength tested per ASTM D1002. Adherends are 2024-T3 bare aluminum treated with phosphoric acid anodizing per ASTM D3933. Adhesive cure cycle: 120 minutes @ 350°F/177°C.

Typical Results for Film Weight

<u>Test Temperature, °F/°C</u>	0.035 psf (171 g/m ²)		0.050 psf (244 g/m ²)	
	<u>psi</u>	<u>MPa</u>	<u>psi</u>	<u>MPa</u>
77/25	4,600	31.7	5,000	34.5
250/121	4,400	30.3	--	--
300/149	2,900	20.0	3,400	23.4

Double Lap Shear Strength

Properties were measured on double overlap shear specimens of pre-cured epoxy graphite laminate. Adhesive cure cycle: 120 minutes @ 350°F/177°C.

Typical Results for Film Weight

<u>Test Temperature, °F/°C</u>	0.035 psf (171 g/m ²)		0.050 psf (244 g/m ²)	
	<u>psi</u>	<u>MPa</u>	<u>psi</u>	<u>MPa</u>
-67/-55	4,500	31.0	4,400	30.3
77/25	5,000	34.5	5,000	34.5
160/71	5,000	34.5	5,400	37.2
270/132	2,700	18.6	2,800	19.3

Flatwise Tensile

Composite to Honeycomb (co-cured). Specimen was 2" x 2" (5.1 cm x 5.1 cm) honeycomb sandwich bonds using two plies of co-cured epoxy graphite prepreg face sheets bonded to honeycomb core (HRP ³/₁₆ inch/4.76 mm cell, ¹/₂ inch/12.7 mm thick - 8 pcf/128 Kg/m³).

Typical Results for Film Weight

<u>Test Temperature, °F/°C</u>	0.035 psf (171 g/m ²)		0.050 psf (244 g/m ²)	
	<u>psi</u>	<u>MPa</u>	<u>psi</u>	<u>MPa</u>
-67/-55	1,000	6.9	1,000	6.9
77/25	1,000	6.9	1,200	8.3
160/71	1,000	6.9	1,200	8.3

Short Beam Shear Performance

Composite to Honeycomb (co-cured). Properties were obtained using 3" x 6" (7.1 cm x 15.2 cm) honeycomb sandwich bonds from a three-ply co-cured epoxy graphite prepreg face sheet bonded to honeycomb core (HRP ³/₁₆ inch/4.46 mm cell, ¹/₂ inch/12.7 mm thick - 8 pcf/128 kg/m³). Pull rate used 4" (10.2 cm) per minute. Adhesive cure cycle: 120 minutes @ 350°F/177°C.

Typical Results for Film Weight
0.050 psf (244 g/m²)

<u>Test Temperature, °F/°C</u>	<u>psi</u>	<u>MPa</u>
-67/-55	750	5.2
77/25	650	4.5
160/71	650	4.5

Peel Performance

Bell peel strength tested on 2024T-3 bare aluminum adherends treated with phosphoric acid anodizing per ASTM D3933. Cure cycle: 120 minutes @ 350°F/177°C.

Typical Results

<u>Test Temperature, °F/°C</u>	<u>Lb/in</u>	<u>N/25mm</u>
77/25	20	89.6

Environmental Conditioning

Composite Double Lap Shear Strength
 Cure cycle: 120 minutes @ 350°F/177°C

Typical Results

0.050 psf (244 g/m²)

	<u>psi</u>	<u>MPa</u>
Tested @ 77°F/25°C		
Dry	5,400	37.2
1000 hour soak @ 160°F/71°C	4,400	30.3
Tested @ 160°F/71°C		
Dry	5,400	37.2
1000 hour soak @ 160°F/71°C	3,900	26.9

Composite Flatwise Tensile Performance

Typical Results

0.050 psf (244 g/m²)

	<u>psi</u>	<u>MPa</u>
Tested @ 160°F/71°C		
Dry	1,200	8.3
10 day soak @ 160°F/71°C	850	5.9

Environmental conditioning was 160°F/71°C, 100% RH.

Composite specimens for flatwise tensile were co-cured using a 120 minute cure @ 350°F/177°C with a heat up rate of 3° to 5°F(1.8° to 3°C) per minute. Autoclave pressure was 45 psi/310 kPa during cure cycle. Pre-cured laminates for double overlap shear used the same cure with the exception of 85 psi/585 kPa pressure.

Hysol EA 9695
Henkel Corporation
Aerospace Group
Page 4 of 4

Service Temperature

Service temperature is defined as that temperature at which this adhesive still retains 1000 psi/6.9 MPa using test method ASTM D1002 and is >300°F/149°C.

Bulk Resin Properties

T_g dry - cured 1 hr. @ 250°F/121°C 252°F/122°C

T_g dry - cured 1 hr. @ 350°F/177°C 302°F/150°C

T_g, measured by dynamic mechanical analysis, is taken at the knee of the G' curve.

Handling Precautions

Do not handle or use until the Material Safety Data Sheet has been read and understood.

For industrial use only.

General:

As with most epoxy based systems, use this product with adequate ventilation. Do not get in eyes or on skin. Avoid breathing the vapors. Wash thoroughly with soap and water after handling. Empty containers retain product residue and vapors so obey all precautions when handling empty containers.

ONE PART

CAUTION! This material may cause eye and skin irritation or allergic dermatitis. It contains epoxy resins.

Hysol® is a registered trademark of Henkel Corporation.

Rev. 1/01

DISCLAIMER: The information supplied in this document is for guidance only and should not be construed as a warranty. All implied warranties are expressly disclaimed, including without limitation any warranty of merchantability and fitness for use. All users of the materials are responsible for assuring that it is suitable for their needs, environmental and use. All data is subject to change as Henkel deems appropriate.

Users should review the Materials Safety Data Sheet (MSDS) and product label for the material to determine possible health hazards, appropriate engineering controls and precautions to be observed in using the material. Copies of the MSDS and label are available upon request.



Henkel Corporation
Aerospace Group
2850 Willow Pass Road
P.O. Box 312
Bay Point, CA 94565 USA
925.458.8000
www.aerospace.henkel.com

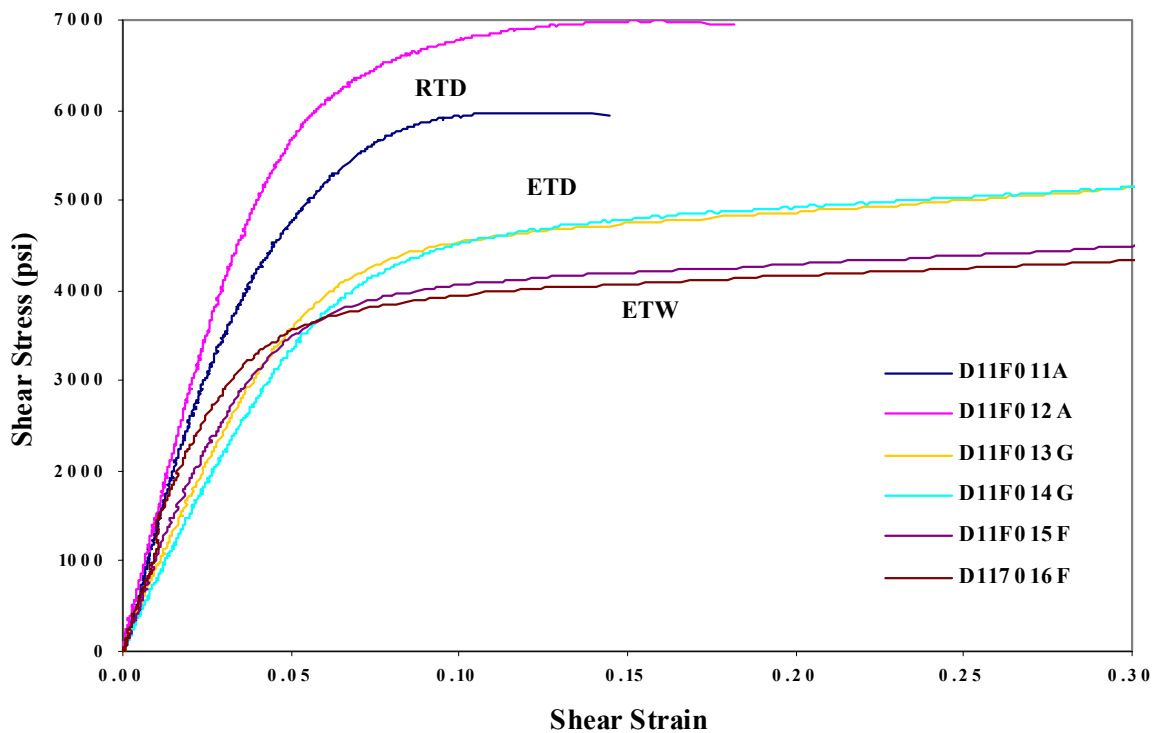


FIGURE A-5. CHARACTERISTIC SHEAR RESPONSE OF EA 9695 FILM ADHESIVE (BOND LINE = 0.011") WITH RESPECT TO THE ENVIRONMENT

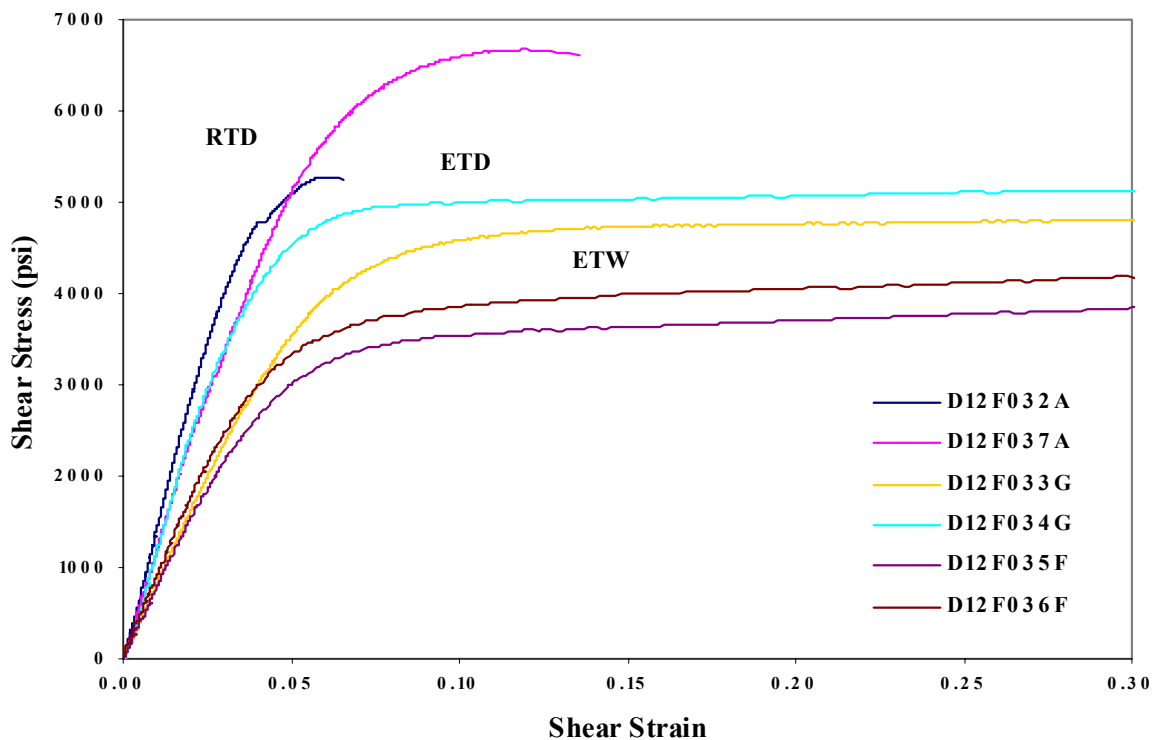


FIGURE A-6. CHARACTERISTIC SHEAR RESPONSE OF EA 9695 FILM ADHESIVE (BOND LINE = 0.034") WITH RESPECT TO THE ENVIRONMENT

TABLE 2. AVERAGE SHEAR STRENGTH AND SHEAR MODULUS FOR FILM ADHESIVES

		RTD				ETD		ETW	
Adhesive Name	Avg. Bond line Thickness (in)	Panel Number	Strength (ksi)	Modulus Msi	Strength (ksi)	Modulus (Msi)	Strength (ksi)	Modulus (Msi)	Modulus (Msi)
AF 126	0.013	1	6.5269	0.1241	4.0236	0.0246	1.4812	0.0069	
AF 126	0.042	2	5.3067	0.1152	3.5885	0.0244	0.9377	0.0023	
EA 9628	0.010	1	6.2105	0.1037	5.6730	**	4.2368	0.0471	
EA 9628	0.031	2	5.8553	0.1364	4.2792	0.0664	3.7153	0.0534	
EA 9695	0.011	1	6.4816	0.1416	5.4993	0.0811	5.3412	0.0788	
EA 9695	0.034	2	5.9497	0.1332	4.9712	0.0810	4.7314	0.0804	
EA 9696	0.011		6.7582	0.1179	5.5199	0.0564	4.7151	0.0427	
FM 300	0.014	1	6.8042	0.1150	5.3061	0.0836	5.0003	0.0826	
FM 300	0.033	2	6.7260	0.1278	4.6795	0.0841	4.4569	0.0796	
FM 73	0.019	1	4.9333	0.0878	3.5780	0.0322	2.4119	0.0117	
FM 73	0.028	2	5.0695	0.0772	3.2015	0.0256	1.3772	0.0045	

NOTE: ** - Excessive vibration in extensometer data

Silikonheizmatten HSI



Flexible Silikonheizmatten, spritzwassergeschützt

Typ HSI

Anwendungsmöglichkeiten:

Beheizung von komplizierten Oberflächen, Teilen und Formen.

200

Betriebstemperatur	max. 200 °C
Min. Umgebungstemperatur	-60 Å°C
Nennspannung	230 V AC/DC
Nennleistung	6500 W/m2 (Standard) und mehr
Temperatursensor	einvulkanisiert oder in Fühlertasche PT 100, FeCuNi
Übertemperaturschutz	mit 2. PT 100 oder Thermoschalter
Anschlussleitung	Standard: im Silikonblock vergossen Wahlweise: Kabel / Litzen
Steckerverbindung	siehe Tabelle Seite 88
Schutzart	IP 65 (EN 60529)
Schutzklasse	2 oder 3
Material	Silikon, silikonbeschichtetes Glasgewebe
Abmessungen	max. 910 x 2400 mm
Heizelementdicke	3mm
Befestigung	Kleben, Binden, Haken, Å-sen, Klettverschluss, Selbstklebeschicht

Temperaturregler HT 55



Selbstoptimierender Doppelregler für den Schaltschrankbau Serie HT 55

Der HT 55 ist durch seine freie Konfigurierbarkeit und kompakte Bauweise ein universeller Regler für den Maschinen-, Anlagen- und Apparatebau. Besonderer Wert wurde bei der Konstruktion dieses Gerätes auf eine einfache und übersichtliche Handhabung gelegt. Die Montage auf Normschienen und die abziehbaren Klemmen (Steckblöcke) garantieren auch den Einsatz unter schwierigen Einbaubedingungen im Schaltschrank.

Konfiguration	als Duoregler ist jeder Kanal einzeln konfiguriert als Regler / Begrenzer überwacht ein Kanal jeweils den anderen
Spezialfunktionen	Selbstoptimierung der Reglerparameter für schnelles Anpassen an Umgebungsbedingungen Sicherheitsbetriebsmodus durch Vorschaltung der Relais vor die Triac-Regelung zum Ausschalten beim Fehleralarm Sollwertbegrenzung und Sollwertkorrektur einstellbar. Befestigung auf 35 x 7,5 mm Tragschiene nach DIN 50022
Gehäuseregler	Im Gehäuse ausgerüstet mit Mehrpolsteckdosen passend zu unseren Heizsystemen
Versorgungsspannung	230 Volt AC / 50 Hz oder 24 Volt DC 115 Volt AC / 50 - 60 Hz optional
Störfestigkeit	EN 50 082-2
Störaussendung	EN 50 082-1
Fühlerart	Fe-CuNi (J), NiCr-Ni (K) PT 100 DIN/IEC, Fühlerbruchsicherung, Fühlerverpolungskontrolle, Kurzschlussüberwachung
Fehlergrenze	1 % der Relativtemperatur
Reglerausgänge	A: über 2 interne Triacs max. Leistung 1200 W für beide Kanäle zusammen B: über 2 mechan. Schaltrelais, Schaltleistung 2 x 1500 W bei 230 V AC C: 2 x 12 V DC zur Ansteuerung eines Solid State Relais zum Schalten hoher Leistungen
Anzeige	3-stelliges LED Display (13 mm) Scan-Operation zwischen Kanal 1 und 2
Anschlussleitung	steckbare Anschlussklemmen
Schutzart	IP 40, mit Gehäuse IP 65
Schutzklasse	1
Abmessungen	72 x 70 x 90 mm (H x B x T)
Option	2 unabhängige 4 - 20 mA Eingänge für externe Sollwertvorgabe beider Kanäle.